

На правах рукописи



ЕМАНОВ Алексей Александрович

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ПРИРОДНОЙ И НАВЕДЕННОЙ
СЕЙСМИЧНОСТИ В АЛТАЕ-САЯНСКОМ РЕГИОНЕ ПО ДАННЫМ
ПЛОТНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

1.6.9 – геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в Алтае-Саянском филиале ФГБУН Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» и ФГБУН Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск).

Официальные оппоненты:

Собисевич Алексей Леонидович, член-корр. РАН, доктор физико-математических наук, профессор РАН, зам. директора, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли РАН им. О. Ю. Шмидта

Буслов Михаил Михайлович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Батугин Андриан Сергеевич, доктор технических наук, профессор, Университет науки и технологий МИСИС: Горный институт. Кафедра безопасности и экологии горного производства. Центр геодинамики недр.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН, г. Иркутск).

Защита состоится 14.04.2026 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.087.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), в конференц-зале 340 (главный корпус).

Отзыв в одном экземпляре, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу:
630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, д. 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/dissertations/emanov2025/dis-Emanov.pdf>.

Автореферат разослан 30 января 2026 г.

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

Н.Н. Неведрова

ВВЕДЕНИЕ

Объект исследования.

Процессы формирования **природной и наведенной** сейсмичности в структуре Земной коры Алтае-Саянской горной области и прилегающих территорий.

Актуальность обусловлена необходимостью перехода от традиционного мониторинга сейсмичности к комплексному анализу её природных и техногенных факторов. Это связано с возрастающими требованиями к точности прогнозирования и оценке рисков в условиях роста антропогенного воздействия на геологическую среду.

Изучение коровой сейсмичности Алтае-Саянской складчатой области активно развивалось во второй половине XX века благодаря развертыванию региональной сети сейсмических станций с аналоговой регистрацией данных и ручной обработкой. На рубеже XX–XXI веков переход на цифровые станции открыл новые возможности, но потребовал разработки более совершенных систем сбора данных и создания современных центров обработки информации.

Для повышения точности исследований сейсмичности потребовались эксперименты, обеспечивающие репрезентативность данных и высокую точность определения параметров очагов. В связи с этим актуальными стали:

- Эксперименты с временными сейсмическими станциями в очаговых зонах крупных землетрясений и областях тектонической активизации;
- Изучение активизации недр в местах техногенного воздействия;
- Исследования в районах строительства важных инженерных объектов.

Особое значение приобрело изучение динамики сейсмичности в наиболее активных очаговых зонах, включая:

- Реконструкцию структуры активизированных разломов;
- Анализ пространственно-временных изменений сейсмической активности;
- Точное определение глубин очагов.
- Сопоставление сейсмичности с линеаментными зонами для уточнения исходной сейсмичности и детального сейсмического районирования.

Значительный импульс исследованиям дали крупные землетрясения в Алтае-Саянском регионе: **Чуйское (2003 г.), Саянское (2011 г.), Тувинские (2011–2012 гг.), Бачатское (2013 г.), Айгулакское (2019 г.), Хубсугульское (2021 г.)**. А также сохраняющие активность очаговые зоны исторических событий (**Урэг-Нурское 1970 г., Бусингольское 1991 г.** и др.).

Активизированные разломные системы в этих областях позволили по-новому интерпретировать связь тектонических процессов с сейсмичностью.

Традиционно эпицентральные исследования проводятся в течение года после сильных землетрясений. Однако в данной работе акцент сделан на **многолетнем мониторинге** изменений сейсмичности не только в очаговых зонах, но и в прилегающих тектонических структурах.

В XXI веке рост масштабов добычи полезных ископаемых привел к возникновению **наведенной сейсмичности** в ранее асейсмичных районах. Особую

важность приобрели исследования техногенного влияния с высокой детальностью и точностью. Так, **Бачатское землетрясение 2013 г. (ML=6.1)** продемонстрировало разрушительный потенциал таких процессов.

Отдельную проблему представляет **платформенная сейсмичность юга Западной Сибири**, слабо изученная ранее, но представляющая угрозу из-за высокой плотности населения и развивающейся инфраструктуры.

Кроме того, в Алтае-Саянском регионе ведется строительство крупных инженерных сооружений, что требует **уточнения исходной сейсмичности** и более детальных сейсмологических данных для оценки рисков.

Цель исследования: Закономерности развития **природной и наведенной сейсмичности** в Алтае-Саянской горной области, полученные с **повышенной детальностью и точностью** для **уточнения оценки сейсмической опасности.**

Научные задачи:

1. Создание автоматизированной системы мониторинга - сбора и обработки данных стационарных и временных сейсмологических станций в Алтае-Саянской области на основе современных технологий, программных продуктов, баз данных, с использованием геоинформационных систем и методов цифровой обработки, адаптированных для сетей наблюдений с различной плотностью.
2. На основе высокоточных экспериментов с плотными сетями временных и стационарных станций и современных методов обработки информации для локальных сетей в районах природных сейсмических активизаций определить закономерности структуры сейсмически активных разломов и изучить эволюцию сейсмичности во времени и пространстве.
3. Определить виды наведенной сейсмичности, ее свойства и закономерности возникновения и развития на основе высокоточных экспериментов с локальными сетями станций.

Фактический материал, методы исследования.

Основой решения поставленных задач являются современные информационные технологии цифровой регистрации, системы передачи данных, конфигурация и исполнение центра сбора и обработки сейсмологических данных, реляционные базы данных, системы контроля качества экспериментальных данных и оценки соотношений сигналов и шумов с их мониторингом во времени. Важнейшим моментом является соединение с сейсмологическими данными информации о рельефе местности, тектонике, геологии и другой информации.

Основным экспериментальным материалом для исследований являлись трехкомпонентные данные регистрации системой станций, передаваемые в реальном времени в центр обработки данных. Создание системы выполнялось под руководством и при непосредственном участии в работе соискателя. Полевые эксперименты с плотными сетями станций в зонах сейсмических активизаций природных и техногенных выполнялись на протяжении двух десятилетий в разных районах Алтае-Саянской области и обеспечили высокоточную информацию для формирования фундаментальных и практически значимых результатов о сейсмическом процессе в Алтае-Саянской области.

Особую роль в изучении сейсмотектонического процесса соискателем играют экспериментальные исследования высокой детальности и точности на Алтайском сейсмологическом полигоне с 2002 года по настоящее время.

При исследовании Хубсугульского землетрясения 2021 года исследования проводились по сети станций Алтае-Саянского и Байкальского филиалов ФИЦ ЕГС РАН совместно с данными сети станций Монголии, а также для исследования сейсмичности Прихубсугулья использовались открытые данные международного эксперимента с 26 станциями в районе оз. Хубсугул, функционирующими с 14 августа 2014 года по 11 июня 2016 года.

Сбор и обработка данных сформированы и использованием современного программного обеспечения SeisComP, дополненного организованной структурой сбора и хранения информации, программ контроля качества поступающих данных, программ разных уровней обработки информации. Для регионального уровня используется программа LocSat в рамках глобальной скоростной модели IASPEI91, также используются пакеты программ HYPOINVERSE-2000 [Klein, 2002] и hypo71 [Lee, Lahr, Valdes] для локации событий в рамках многослойной скоростной модели, метод двойных разностей HypoDD [Waldhauser and Ellsworth, 2000] для уточнения положения гипоцентров землетрясений, сейсмическая томография с двойными разностями TomoDD [Zhang, Thurber]. Пакет программ FPFIT [Reasenberг and Oppenheimer, 1985] для расчета и отображения фокальных механизмов. Восстановление поля тектонических напряжений земной коры осуществлялось методом катакластического анализа [Ребецкий, 1999, 2007]. Нейронная сеть детектора EqTransformer для определения фаз Р и S сигналов землетрясений [Mousavi, 2020].

В работе используются современные геоинформационные системы ArcVIEW и ArcGIS, свободно распространяемая ГИС система QGIS и высокоточные цифровые модели рельефа на основе радарной топографической съемки SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) с пространственным разрешением 3x3" (<http://srtm.csi.cgiar.org>).

Защищаемые научные положения:

1. Научно обоснованные решения, совокупность которых формирует систему сейсмологического мониторинга Алтае-Саянского региона - регистрацию и обработку информации для многоуровневой системы наблюдения, сочетающую высокую автоматизацию решения задач с точностью и детальностью исследований на основе сочетания методов обработки с моделями среды, с системой наблюдения и с использованием геологической и геофизической информации для интерпретации результатов.
2. Установлены закономерные различия в сейсмотектонических процессах между Горным Алтаем, Западным Саяном и Тувино-Монгольским блоком Алтае-Саянской области, проявляющиеся в характерном для каждого субрегиона влиянии сильных землетрясений на последующую эволюцию сейсмичности и формирование новых очагов сейсмогенной активизации.

3. Афтершоковые процессы крупных землетрясений в условиях Алтае-Саянской горной области закономерно переходят в продолжительные (годы и десятилетия) сейсмические активизации очаговых областей и характеризующиеся сложной пространственно-временной организацией (многоэтапность, пульсации) с формированием объемных, сейсмически активных разломных структур.
4. Наведенная сейсмичность в Кузнецкой котловине (угольном Кузбассе), развивается как нестационарный процесс с изменением сейсмической активности во времени и пространстве без синхронизации между отдельными активизациями, а в Горной Шории для трёх железорудных шахт на расстояниях в десятки километров наблюдается эффект частичной синхронизации сейсмической активности во времени.

Новизна работы.

1. Созданная система сбора и обработки данных является аппаратом выполнения исследований с использованием современных методов и программ для сейсмологии и геофизики, дополненных работой автора и объединенных в единую надежную систему. В едином комплексе программ объединены возможности обрабатывать данные много уровней по детальности и задачам экспериментов.
2. На основе исследования с точностью координат гипоцентров афтершоков в 300-500 м и по глубине с точностью 2 км построена объемная модель сейсмически активизированных разломов и горизонтальных слоев в очаге Чуйского землетрясения 2003 года.
3. Определены закономерности эволюции сейсмичности Алтая после Чуйского землетрясения 2003 года. Установлены факты сейсмической активизации смежных структур и активизированные структуры в зоне дальнего влияния крупного землетрясения на развитие сейсмичности.
4. Построена объемная структура афтершокового процесса двух Тувинских землетрясений 2011 и 2012 годов.
5. Получена пространственно-временная структура развития афтершокового процесса Хубсугульского землетрясения. Изучен Дархадский рой землетрясений, возникший после этого землетрясения.
6. Исследованы сейсмические активизации Тувино-Монгольского блока до и после Хубсугульского землетрясения, и показан отличающийся от Чуйского землетрясения механизм воздействия этого крупного землетрясения на сейсмичность региона.
7. С использованием программ искусственного интеллекта обработаны данные международного эксперимента с 26 регистрирующими станциями в Прихубсугулье. Показано, что Хубсугульское землетрясение 2014 года произошло вне очаговой области одноименного землетрясения 2021 года. Построены координаты гипоцентров более 5.5 тысяч землетрясений в этом

районе, позволившие обнаружить сейсмическую активность внутри блоков с не изученной структурой разломов.

8. По механизмам очагов землетрясений восстановлено напряженное состояние очаговых областей Чуйского землетрясения 2003 года и техногенного Бачатского землетрясений. Подтверждена иерархическая модель напряженного состояния для блоковых структур, теоретически обоснованная Д.Н. Осокиной.
9. Построена объёмная структура афтершоков крупного техногенного Бачатского землетрясения и структура напряжённого состояния недр под разрезом, позволяющая контролировать дальнейшее изменение состояния среды при продолжающейся добыче угля в разрезе.
10. Изучена природа возникновения, характеристики наведённой сейсмичности и изменения во времени и пространстве их в районе подземной добычи угля. Установлен эффект триггерного влияния вибрации от работающих комбайнов на наведённую сейсмичность.

Личный вклад.

Автором внесён основной вклад в создание центра сбора и обработки сейсмологических данных Алтае-Саянского региона. Им сформированы базы данных, охватывающие первичные данные, результаты различных этапов обработки, а также материалов региональных геофизических исследований, используемых как априорная информация в процессе обработки данных сейсмологии. Соискатель является автором программ, организующих обработку данных и контроль качества работы аппаратуры в экспериментах, а также непрерывный контроль шумов на сети сейсмических станций.

Еманов А.А. в более чем 20-летний период активный участник и руководитель экспериментальных работ с временными сетями сейсмических станций на Алтайском сейсмологическом полигоне, при изучении очаговой зоны Чуйского землетрясения 2003 года, Айгулакской очаговой зоны. Он руководитель и участник экспериментальных работ в очаговых зонах Урэг-Нурского землетрясения, 1970г, Тувинских землетрясений 2011-2012гг, при исследовании техногенной сейсмичности Кузбасса и Горловского угольного бассейна в Новосибирской области и др.

Соискатель внёс крупный вклад в формирование программных пакетов для обработки данных сетей станций разной плотности. Внедрил в практику использование самых современных подходов определения гипоцентров землетрясений и автоматизацию процессов обработки данных с использованием возможностей искусственного интеллекта.

Является соавтором получения картины иерархической структуры напряжённого состояния природных и техногенных очаговых зон, теоретически обоснованных в работах Д.Н. Осокиной, а также обнаружил и изучил влияние крупных землетрясений на дальнейшее развитие сейсмичности в разных областях Алтае-Саянской области.

Практическая значимость результатов.

Созданная система сбора и обработки сейсмологической информации обеспечивает оперативность и достоверность в предоставлении информации структурам власти, сотрудникам МЧС, предприятиям для решения вопросов безопасности. Созданные базы данных являются основой работы по уточнению исходной сейсмичности и построения карт детального сейсмического районирования. Данные о физике очагов крупных землетрясений Алтае-Саянской области важны для разработки методов прогноза землетрясений. Пространственно-временные связи в сейсмичности и данные об эволюции сейсмичности составляют основу планирования экспериментов по уточнению мест зарождения сейсмических активизаций. Данные о сейсмически активизированных в очаговых областях разломах вносят вклад в геотектонику.

Результаты изучения характеристик техногенной сейсмичности в местах добычи твердых полезных ископаемых дают возможность оценить уровень их реальной опасности для производственной и социальной инфраструктуры.

Апробация работы.

Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационного исследования были доложены на **26 международных** (Боровое, Казахстан, 2008; Херсонес, Греция, 2008; Цукуба, Япония, 2008; Вена, Австрия, 2008, 2009, 2010; Улан-Батор, Монголия, 2007, Ханой, Вьетнам, 2010; Стамбул, Турция, 2011, 2014; Москва, Россия, 2012; Санкт-Петербург – Москва, Россия, 2013; Канкун, Мексика, 2013; Новокузнецк, Россия, 2018; Новосибирск, Россия, 2014, 2015, 2017; Бишкек, Киргизстан, 2014; Макати, Филиппины, 2014; Курчатов, Казахстан, 2014; Алматы, Казахстан, 2017; Кобе, Япония, 2017; Валетта, Мальта, 2018; Кишинев, Молдова, 2019; Минск, Беларусь, 2022; Ташкент, Узбекистан, 2023; Витебск, Беларусь, 2024), **19 региональных и всероссийских** (Иркутск, 2009, 2012, 2014, 2023, 2024; Москва, 2010, 2013, 2015, 2016, 2023; пос. Черный Ануи, Алтайский край, 2010, 2012; Новокузнецк, 2018,; Новосибирск, 2013, 2013а, 2013б, 2014, 2021, 2023, 2024; Апатиты, 2013; Кызыл, 2015; Саяногорск, 2016, 2023, 2024; Барнаул 2023; Новокузнецк, 2023) семинарах, конференциях и симпозиумах;

Публикации.

По теме диссертации опубликованы 78 статей из списка ВАК из них 58 статей по теме диссертации по специальности 1.6.9. «Геофизика», из них в Белом списке: уровень 1- 11 статей, уровень 2 – 44 статьи, 5 глав в трех монографиях. Получены два свидетельства государственной регистрации на базы данных и одно на программу.

Структура и объем диссертации.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 336 наименований. Полный объем диссертации – 322 страницы, включая 110 рисунков и 6 таблиц.

Благодарности.

Автор благодарен всему коллективу ФИЦ ЕГС РАН и АСФ ФИЦ ЕГС РАН за всестороннюю поддержку на всех этапах исследования, в частности: члену-корр.

РАН А.А. Маловичко, д.т.н. А.Ф. Еманову, д.г.-м.н. В.С. Селезневу, д.т.н. Виноградову Ю.А., к.г.-м.н. В.М. Соловьеву, к.ф.-м.н. А.В. Фатееву.

Автор благодарен сотрудникам ИНГГ СО РАН: академику М.И. Эпову, члену-корр. РАН В.Н. Глинских, члену-корр. РАН И.Ю. Кулакову, д.т.н. Ю.И. Колесникову, д.ф.-м.н. В.Ю. Тимофееву, д.г.-м.н. В.Д. Суворову, д.г.-м.н. Е.А. Мельник, д.г.-м.н. Н.Н. Неведровой, к.ф.-м.н. О.А. Кучай, к.г.-м.н. П.Г. Дядькову за плодотворные обсуждения работы в ходе ее выполнения.

Автор благодарен сотрудникам ИГД СО РАН: член-корреспонденту, д.т.н. А.А.Ерёменко, д.ф.-м.н. Л.А.Назарову, д.ф.-м.н. Е.Н.Шер, д.т.н. В.М.Серякову за обсуждение работы и замечания, способствовавшие её улучшению.

Автор выражает особую признательность сотрудникам ИФЗ РАН: д.ф.-м.н. Ю.Л. Ребецкому, д.г.-м.н. Л.А. Сим, д.ф.-м.н. О.В. Павленко, д.ф.-м.н. А.Д.Завьялову, к.г.-м.н. А.Н. Маринину за совместные работы и обсуждение результатов во время встреч.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении обосновывается актуальность диссертации, объект и цель исследований. Показана новизна исследований, личный вклад соискателя, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Обзор исследования сейсмичности Алтае-Саянской горной области

В первой главе описан технический уровень экспериментальных сейсмологических работ в Алтае-Саянской горной области и результаты исследования региональной сейсмичности. В обзоре отмечаются важнейшие результаты, полученные до соискателя и отмечен вклад в изучение сейсмичности региона отечественными и зарубежными учеными. Отмечены нерешенные проблемы изучения землетрясений, среди которых: отсутствие информации о глубинах землетрясений в регионе, не достаточное исследование афтершоковых процессов крупных землетрясений и свойств фоновой сейсмичности, а также не исследована наведенная сейсмичность, формирующаяся в районах сильного техногенного воздействия на геосреду.

Основными задачами диссертационного исследования развития сейсмичности Алтае-Саянской горной области являются:

1. Разработка математического обеспечения и технического исполнения центра сбора, обработки и хранения сейсмологической и региональной геологической и картографической информации. Контроля качества и непрерывности регистрации и передачи данных от сети сейсмических станций в центр.

2. На основе высокоточных экспериментов с плотными сетями временных и стационарных станций и современных методов обработки информации для

локальных сетей в районах природных сейсмических активизаций определить закономерности структуры сейсмически активных разломов и изучить эволюцию сейсмичности во времени и пространстве.

3. Определить виды наведённой сейсмичности, её свойства и закономерности возникновения и развития на основе высокоточных экспериментов с локальными сетями станций.

Глава 2. Структура системы регистрации и обработки данных сейсмологического мониторинга

Вторая глава посвящена созданию системы сбора, хранения и обработки данных в реальном времени с сети цифровых сейсмологических станций, основанной на современной высокоточной аппаратуре, системах непрерывного контроля качества получаемых данных, организации хранения и доступа к экспериментальным материалам на основе реляционной базы данных. Основу экспериментальных работ составляет четырехуровневая система, ориентированная на обработку: 1. региональных данных; 2. данных экспериментов на сейсмологических полигонах: Алтайский сейсмологический полигон (природная сейсмичность), полигон для изучения наведенной сейсмичности Кузбасса; 3. исследования на уровне локальных сейсмически активных геологических объектов и в районах предприятий с сильным техногенным воздействием на земную кору, выполняемых временными сетями станций при высокой плотности размещения станций на малых по размерам площадях; 4. мониторинг на уровне отдельных зданий с определением сейсмического воздействия на них и реакции здания на сейсмическое воздействие (плотины крупных ГЭС, территории крупных промышленных предприятий и уникальных зданий и сооружений, театры, высотки и т.п.).

Информационная система центра сбора и обработки сейсмологических данных создана на базе пакета программ SeisComP, стандартов Федерации цифровых сейсмологических сетей (FDSN), геоинформационных систем и собственного программного обеспечения, адаптированного под региональные задачи. Система обеспечивает надежность и отказоустойчивость за счет модульной архитектуры, где все компоненты функционируют как независимые блоки, взаимодействующие через стандартизированные интерфейсы. При сбое модуль автоматически перезапускается без потери данных или прерывания работы других элементов. Автоматизация охватывает 95% операций, включая прием, первичную обработку и архивацию данных, а ручное вмешательство требуется только в нештатных ситуациях, например, при аппаратных поломках. Пользователь взаимодействует с системой через интуитивные логические сущности (сейсмостанции, каналы, временные диапазоны), не затрагивая файловые структуры: например, для запроса данных о землетрясении достаточно указать название станции, идентификатор канала и временной интервал. Защита данных реализована через аутентификацию по цифровым сертификатам, ролевою модель доступа и шифрование на этапе передачи. Встроенные механизмы предотвращают

некорректные изменения данных пользователем и нарушение целостности взаимосвязей в базе. Преимущества системы включают сокращение времени обработки данных, минимизацию человеческого фактора, совместимость с международными сейсмологическими сетями (благодаря FDSN) и гибкость интеграции новых алгоритмов без изменения архитектуры. Вся сейсмическая сеть передает непрерывную информацию в режиме реального времени с задержками не больше, чем необходимо для формирования пакетов протокола seedlink.

Обработка данных делится на этапы: автоматическая, оперативная, ежедневно уточняющаяся, окончательная.

Полученные результаты главы 2

Создана система сбора и обработки сейсмических данных, являющаяся аппаратом выполнения исследований с использованием современных методов и программ для сейсмологии и геофизики, дополненных работой автора и объединенных в единую надежную систему. Реляционные базы данных заполняются в реальном времени записями стационарных станций, временных станций и результатами обработки.

Созданное математическое обеспечение позволяет выполнять контроль за работой сейсмических станций, качеством регистрации и проведением мониторинга шумов во времени.

Экспериментальные работы, при наличии временных станций в районах сейсмических активизаций, способны обеспечить исследования на новом уровне представительности и точности изучения землетрясений в локальных областях.

Разработана система обработки данных для многоуровневой системы наблюдения по детальности, сочетающая высокую автоматизацию решения задач с точностью и детальностью исследований на основе сочетания методов обработки с моделями среды, детальностью системы наблюдения и с использованием геологической и геофизической информации для интерпретации результатов.

Адаптированы программы искусственного интеллекта для обработки данных экспериментов с плотными сетями станций.

Глава 3. Природная сейсмичность Алтае-Саянской горной области

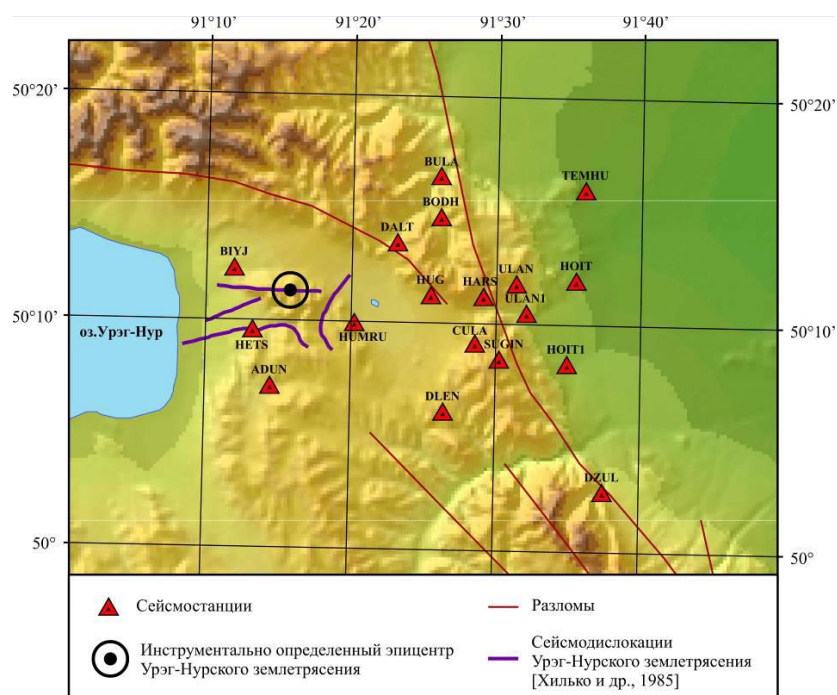
Свойства фоновой сейсмичности изучены с использованием данных региональной сети станций за все годы, начиная от инструментальных наблюдений с 1963 года. Установлено, что фоновая сейсмичность, хаотичная на первый взгляд, упорядочивается со временем, концентрируясь преимущественно в горном обрамлении впадин. Наблюдается стабильность во времени в организации фоновой сейсмичности, а также иерархия тектонических процессов по скорости проявления в сейсмичности.

Крупным землетрясениям в Алтае-Саянской складчатой зоне сопутствуют афтершоковые процессы и во многих случаях длительные сейсмические активизации очаговых областей. Основу экспериментального изучения сейсмически активизированных структур составляют эксперименты с временными

сетями станций, позволяющие достичь нового уровня представительности, детальности и точности.

Исследование проводилось с учетом работ предшественников [Зятькова, 1977; Хилько, 1977; Уфлянд и др., 1978; Хилько и др., 1985; Кочетков и др., 1993; Дельво и др., 1995; Добрецов и др., 1995, 2001; Молнар и др., 1995; Новейшая тектоника..., 2000; Хаин, 2001; Рогожин и Платонова, 2002; Новиков, 2004; Актуальные вопросы..., 2005; Современная геодинамика..., 2005] и результатов интерпретации сейсмологических данных по этому региону [Гайский и Жалковский, 1971; Масарский и Рейснер, 1971, Кочетков и др., 1993; Жалковский и др., 1995; Баяр и Монкоо, 2002; Гольдин и Кучай, 2006; Ребецкий и др., 2008].

a)



б)

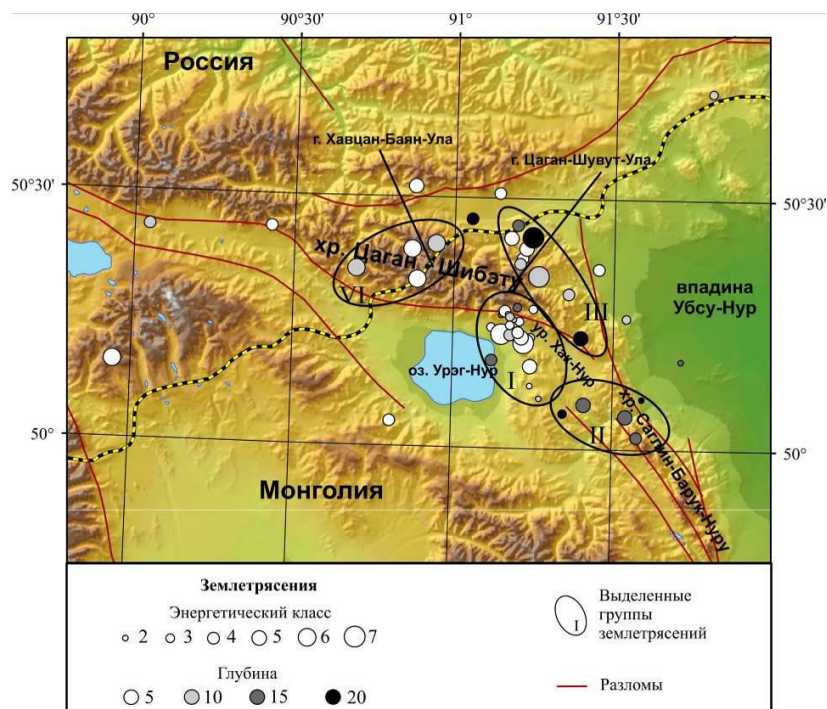


Рисунок 1 – Карта эпицентров землетрясений, зарегистрированных в районе оз. Урэг-Нур локальной сетью станций в августе 2006 г. *а* – карта расположения временных станций; *б* – эпицентры землетрясений.

Урэг-Нурское землетрясение 16.05.1970 ($M_S=7.0$) до Чуйского землетрясения 2003 года было сильнейшим землетрясением Алтая за период инструментальных наблюдений. Эксперименты с временной сетью станций проведены, когда афтершоковый процесс этого землетрясения давно завершился. Выполнен анализ афтершоковой активности очаговой области по данным региональной сети станций. Наблюдалась сейсмическая активизация зоны длиной около 90 км. Отмечается уменьшение во времени линейного размера активизированной области и через пять лет сейсмическая активность уменьшается до фонового уровня. Через четыре года после главного толчка наблюдается активизация, примыкающая к очаговой области, и выделяющаяся как процесс, не соответствующий закону Омори, что позволяет интерпретировать ее как сопутствующий сейсмический процесс на параллельном разломе.

В 2006 г. в районе эпицентра Урэг-Нурского землетрясения был проведен эксперимент с временной сетью сейсмических станций [Еманов и др., 2008; 2012] с целью получить информацию о сейсмоактивных структурах района и о глубинах землетрясений (Рисунок 1а). Выделены четыре обособленные группы событий, приуроченных к разным блокам горного обрамления впадин (Рисунок 1б).

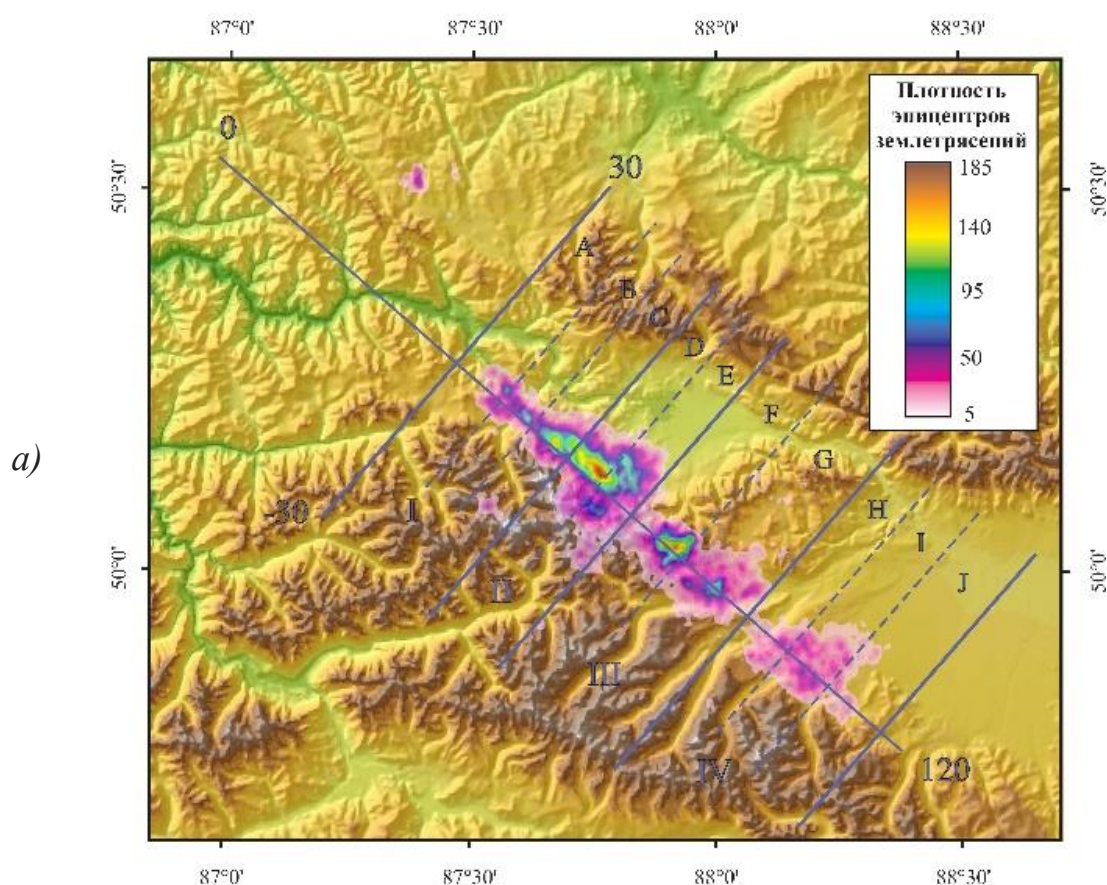
Сейсмический процесс формируется во внутренних частях горных массивов:
– а землетрясений в районе горы Цагдул-Ула (эпицентр Урэг-Нурского землетрясения) характеризуется малыми глубинами землетрясений (около 5 км).

– Землетрясения в массиве хр. Саглин-Барук-Нуру происходят на глубинах более 15 км. Этот блок не был охвачен интенсивным афтершоковым процессом после Урэг-Нурского землетрясения.

– В хр. Цаган-Шибету, выделено две группы землетрясений. Первая группа событий соответствует массиву горы Цаган-Шувут-Ула, где афтершоковый процесс был наиболее интенсивным, глубины гипоцентров здесь 5-20 км. Вторая группа пространственно принадлежит к массиву горы Хавцал-Баян-Ула, в этом месте через пять лет после главного толчка произошло землетрясение с афтершоковой активизацией очаговой области, примыкающей к очаговой области Урэг-Нурского землетрясения. Землетрясения этой группы происходят на глубинах 5-10 км.

– В механизмах очагов современных событий преобладает вертикальная составляющая сдвига, в большинстве наблюдается взбросовый тип подвижки. При этом изменение типов механизмов и простирания их нодальных плоскостей зависят от приуроченности к разным горным блокам.

Полученные данные указывают на то, что Урэг-Нурское землетрясение произошло не на глубинном Цаган-Шибэтинском разломе, а на границе горы Цагдул-Ула с окружающими ее структурами. Разрывы, окаймляющие гору Цагдул-Ула (Рисунок 2) уходят в стороны от нее. Один из разрывов имеет направление, совпадающее с направлением развития афтершокового процесса. Два крупных афтершока по типу механизма очага являются сдвигами с вероятной ориентацией перпендикулярно хребту Цаган-Шибэту.



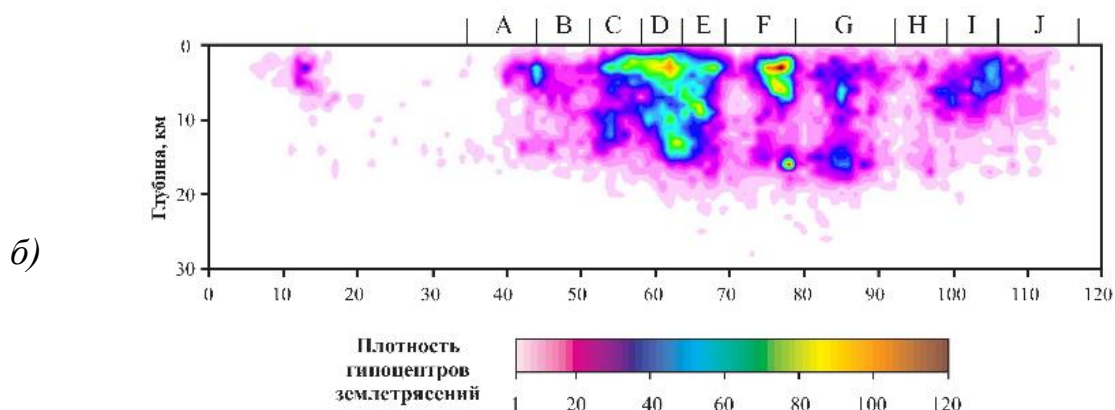


Рисунок 2 – Плотность афтершоков Чуйского землетрясения с 27.09.2003 по 31.12.2009.
а – карта плотности; б – разрез по профилю 0-120

Чуйское землетрясение 27.09.2003 ($M_S=7.3$) – крупнейшее для Алтае-Саянской горной области за период инструментальных наблюдений. Исследования выполнялись как стационарной сетью станций, так и экспериментами с временными станциями, позволившими изучать очаговую область с точностью координат эпицентров до 300 м и глубин очагов до 500 м. Афтершоковый процесс, сформировавшийся после Чуйского землетрясения, на годы стал доминирующим в Алтае-Саянской горной области и отличался устойчивостью сейсмичности активизированных разломов. По высокоточным исследованиям очаговой области изучена объемная структура сейсмически активизированных разломов. Основными особенностями активизированных в очаговой области Чуйского землетрясения разломов являются:

- Неравномерность развития афтершокового процесса по плоскости активизированного разрыва. Существуют участки без афтершоков.
- Существование оперений и раздвоений в афтершоковом процессе по длине магистрального разрыва.
- Существование чаши, заполненной афтершоками с максимумом глубины около 20 км и минимумом глубин по краям.
- Поперечная структура афтершоковой области состоит из сейсмически активизированных разломов и горизонтальных сейсмически активизированных слоев.
- Под Чаган-Узунским блоком как составная часть афтершокового процесса сформировался горизонтальный сейсмически активизированный слой на глубинах 15-20 км по площади, охватывающий размеры всего блока и примыкающий одной стороной к магистральному разлому.
- В районе р. Актру наблюдается маломощный горизонтальный сейсмически активизированный слой на глубине около 2 км, уходящий в сторону Северо-Чуйского хребта.
- В афтершоковом процессе портрет магистрального разрыва выглядит то как расширение на два сближенных разрыва (северо-западное окончание), то как узкий наклонный в сторону гор разлом, то как система разно наклоненных

разломов (район Актру), то как широкая (до 10 км) активизированная зона разлома (район Чаган-Узунского блока), то как сочетание вертикального и наклоненного разломов (граница Чуйской впадины и Южно-Чуйского хребта).

- К афтершоковому процессу относятся и слабо активизированные разломы в Северо-Чуйском хребте на расстоянии 10-20 км от магистрального разрыва.
- По блокам А, В и С на глубинах более 10 км (Рисунок 3) наблюдается активизированная область, уходящая под Курайскую впадину, что является проявлением сейсмически активизированного горизонтального слоя.

Рост сейсмичности начался с повышения активности смежных с афтершоковой областью геологических структур [Еманов и др., 2017; 2021]. Начиная с 2011 года, структура сейсмичности в ближней зоне от очаговой области изменяется (Рисунок 4). Локальная активизация отмечается в Айгулакском хребте, развитие сейсмичности начинается в Курайском хребте в виде небольшого количества слабых землетрясений. Курайский хребет многие годы до Чуйского землетрясения проявлял себя как наиболее сейсмически активная структура Чуйско-Курайской зоны Горного Алтая. В 2012 году отмеченный процесс смещения сейсмичности продолжается в районе Айгулакского хребта, 30.07.2012 происходит Айгулакское землетрясение с $M_L=6.1$. В 2013 году пространственные закономерности активизации смежных структур сохраняются с отличием по энергии землетрясений. Крупнейшее в этот период Южно-Чуйское землетрясение с $M_L=6.0$ сформировало небольшой по площади и времени афтершоковый процесс. В 2014 году сильное землетрясение с $M_L=5.8$ произошло в афтершоковой области Чуйского землетрясения 2003 года. Смежные структуры в этот год отмечены более слабыми землетрясениями.

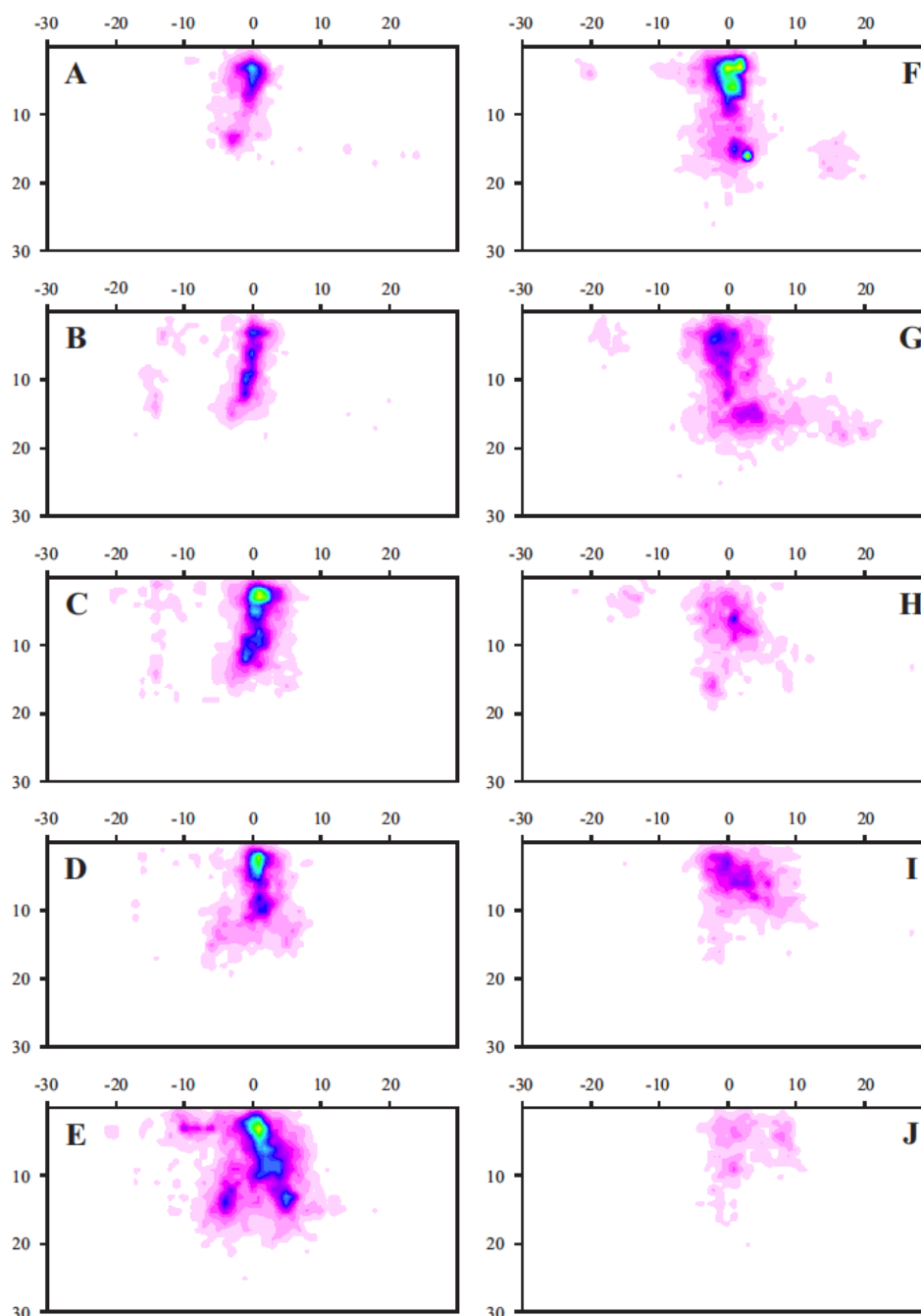


Рисунок 3 – Разрезы плотности гипоцентров афтершоков Чуйского землетрясения в сечениях поперек зоны активизации 2003-2009 гг.

Айгулакская очаговая область. Сейсмическая активность в этой структуре медленно развивалась до 2019 года, когда 13.09.2019 произошли Айгулакские землетрясения в 01:29 UTC с $M_L=5.5$ и в 04:29 UTC с $M_L=5.2$, за которыми последовал мощный афтершоковый процесс. Следует отметить, что Айгулакское землетрясение 2012 года с $M_L=6.1$ не вызвало столь сильного афтершокового процесса, как при Айгулакских землетрясениях 2019 года с $M_L=5.5$ и $M_L=5.2$, произошедших в один день друг за другом. Все три Айгулакских землетрясения произошли практически в одном месте. Другой особенностью являются малые размеры сейсмически активизированной области, которая геометрически близка к кругу в диаметре около 10 км.

В дальнейшем развитии сейсмичности видны два уровня сейсмической активизации вокруг эпицентральной зоны Чуйского землетрясения. Первый уровень – активизация смежных структур (удаления до 100 км), второй – активизация структур на удалениях до 250-300 км от эпицентра.

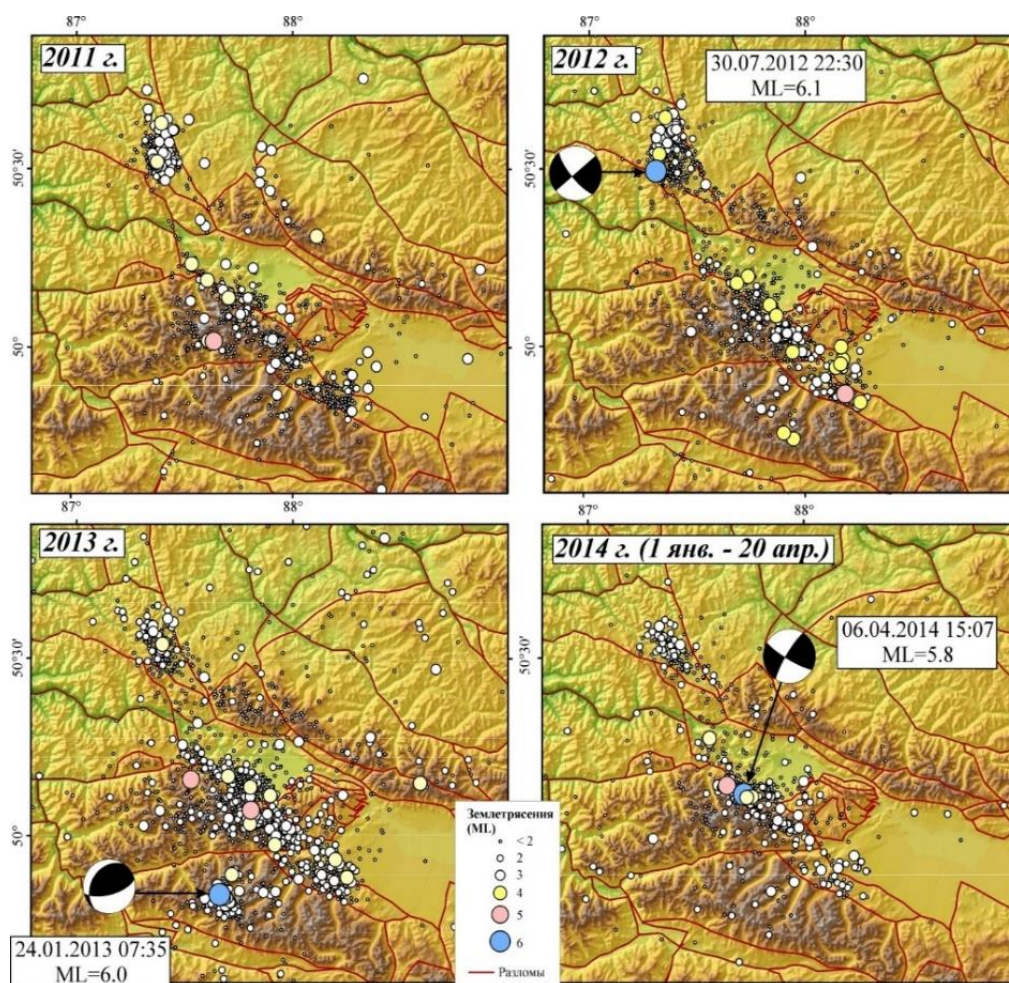


Рисунок 4 – Развитие активизаций в смежных с афтершоковой областью структурах

Многолетними детальными исследованиями развития сейсмичности в Айгулакской очаговой области показано начало активизации в виде слабой роевой сейсмичности, а затем усиление после землетрясения 30.07.2012 с $M_L=6.1$. Выход активизации на новый уровень произошел после Айгулакского землетрясения 13.09.2019 с $M_L=5.5$. Активизация Айгулакской очаговой области протекает в виде серии землетрясений с короткими и подобными афтершоковыми процессами. На Рисунке 5 рассмотрим развитие сейсмической активности очаговой области для периода 2019-2020 гг., характеризующегося резким ростом количества землетрясений. Айгулакское землетрясение 2019 г. не является афтершоком землетрясения 2012 г., так как оно произошло на фоне значительного снижения сейсмичности. После него сформировалась сейсмическая активизация, в начальный период представляющая собой афтершоковый процесс с быстрым снижением количества событий со временем. Однако, дальнейшее развитие событий не является простым процессом с одним крупным землетрясением и

убывающим по экспоненте числом афтершоков. Происходят неоднократные моменты всплеска сейсмической активности Айгулакской очаговой зоны. Наблюдается выраженное увеличение числа землетрясений после события 27.06.2020 с $M_L=4.1$, и особенно после землетрясения 31.07.2020 с $M_L=4.7$.

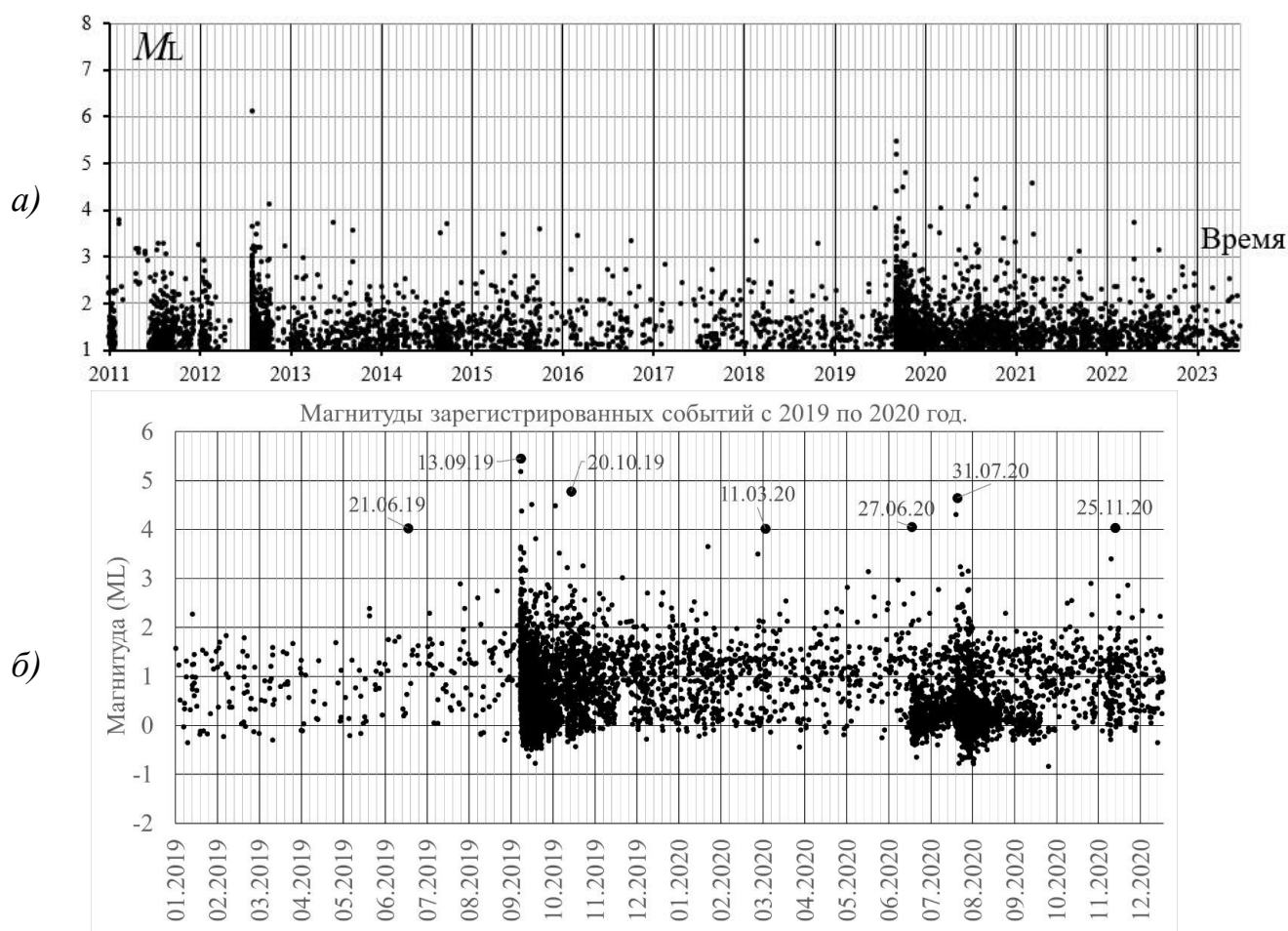


Рисунок 5 – Развитие сейсмического процесса в Айгулакской очаговой области.
 а – интервал с 2011 по 2023 гг., б – детальное рассмотрение интервала с 2019 по 2020 гг.

Не все сильные (с $M_L \geq 4$) землетрясения оказывают заметное влияние на общее развитие сейсмичности в Айгулакской зоне. К примеру, землетрясение 25.11.2020 вызвало лишь едва заметный рост количества землетрясений малых энергий, тогда как землетрясения 21.06.2019 и 11.03.2020 вообще не вызвали сколько-нибудь заметного изменения характеристик сейсмического процесса (Рисунок 5). Айгулакская очаговая область имеет размеры примерно 10×10 км и глубины землетрясений охватываю интервал от сотен м до 20 км с наибольшей плотностью очагов на глубинах 2-5 км.

По плотности очагов землетрясений Айгулакской зоны в 2017 и 2018 гг. (Рисунок 6 а, б) сейсмическая активность мозаична, и даже при высокоточных определениях координат процесс можно рассматривать как отражение крупномасштабной блочной структуры без полного проявления активности ее границ. В 2019 г. (Рисунок 6 в) наблюдается принципиально иной процесс, в котором доминирует активизация одного элемента разлома, в следующем году

активны два параллельных элемента разломов, а через год активен только второй элемент. В 2022 г. (Рисунок 6 е) сейсмичность в Айгулакской очаговой зоне вновь становится мозаичной и охватывает иные тектонические элементы, чем в 2019-2021 гг.

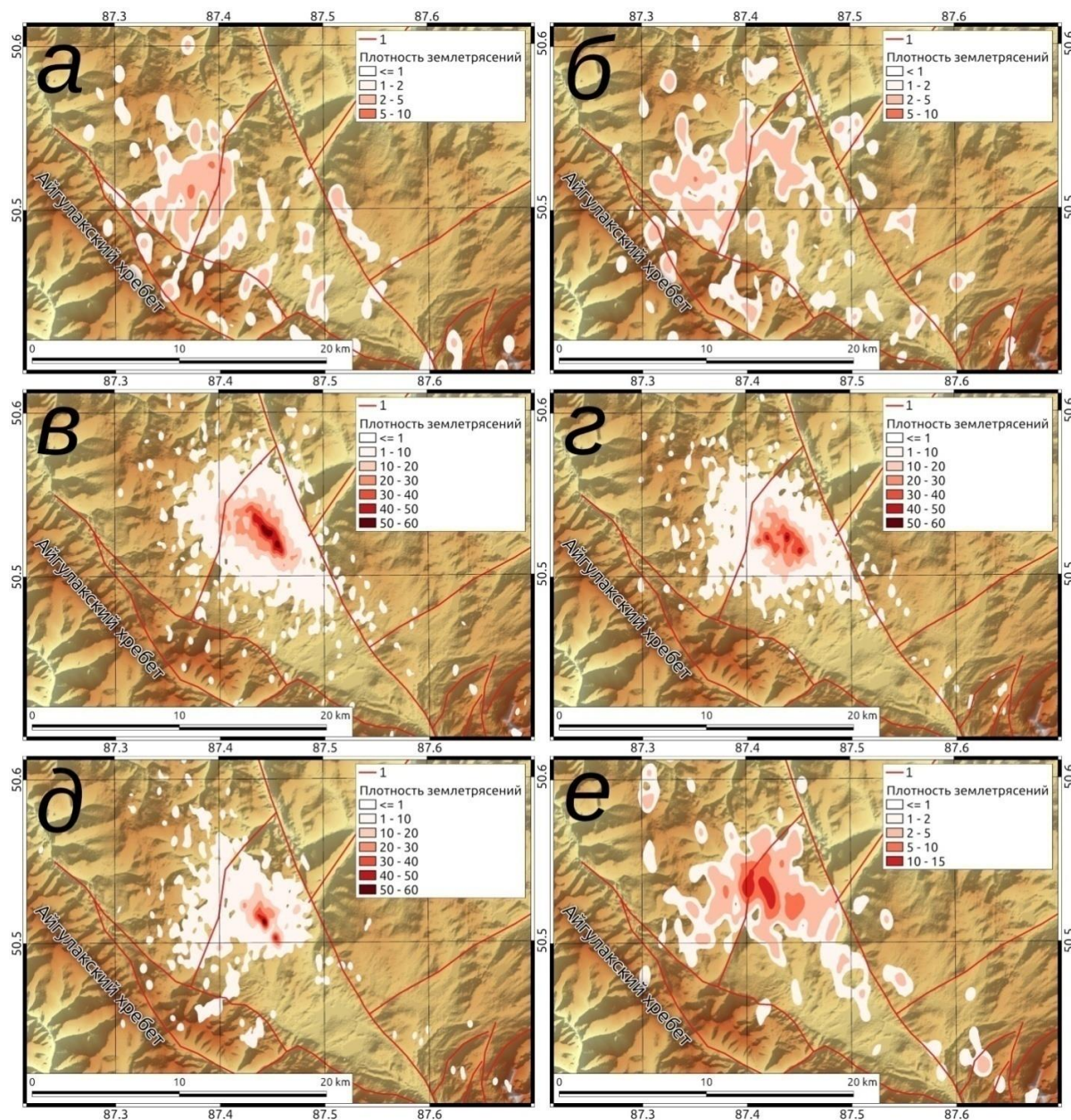


Рисунок 6 – Плотность землетрясений в районе Айгулакского хребта в период с 2017 по 2022 год: а – 2017 г., б – 2018 г., в – 2019 г., г – 2020 г., д – 2021 г., е – 2022 г.

1 – разломы

Айгулакская очаговая область является узловой структурой, через которую проходят разломы, далее веером расходящиеся в разных направлениях. Цепь слабых землетрясений вытянулась от Айгулакской очаговой области вдоль восточного борта хр. Иолго. Говоря о взаимосвязи Чуйской и Айгулакской очаговых областей, отметим, что через обе проходят разломы, не пересекающиеся друг с другом. Очаговые области приурочены к разломам с разных сторон впадин, являющихся стабильными объектами с малой раздробленностью и обладающих

пониженной сейсмичностью. Отмечается факт пространственной передачи напряженного состояния не по разлому, а через деформации стабильных блоков.

Активизации на втором уровне по удаленности от эпицентра Чуйского землетрясения выглядят как локальные очаговые области по окружности вокруг эпицентра Чуйского землетрясения. Большинство – это вновь сформировавшиеся очаговые области.

Цаган-Шибэтинское землетрясение 29.07.2022 ($M_L=6.2$) на данный момент одна из наиболее сейсмоактивных областей второго уровня. В двадцатом веке этот хребет был сейсмически неактивен и соседствовал с сейсмически активными: очаговой областью Урэг-Нурского землетрясения 1970 г. с $M_S=7.0$ и с сейсмически активным Шапшальским хребтом, где происходили часто землетрясения с магнитудой до пяти, и не было крупных землетрясений.

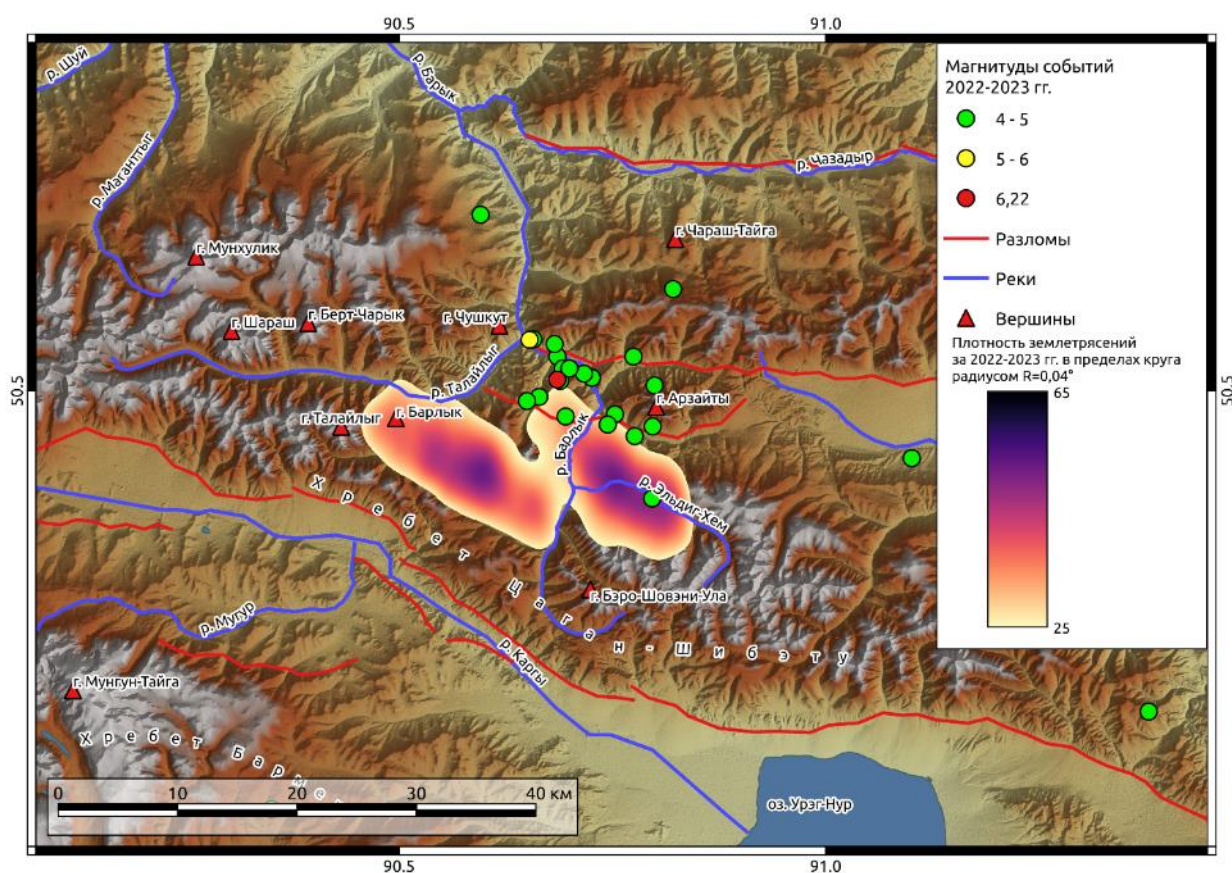


Рисунок 7 – Цаган-Шибэтинское землетрясение 29.07.2022 с $M_L=6.2$ и особенности сейсмичности его очаговой области за 2022-2023 гг.

Данное землетрясение характеризуется сложной очаговой областью (рис.7), в которой сильные землетрясения расположились в основном в границах блока г. Арзайты, ограниченного региональными разломами. Землетрясения $M_L \leq 4$ образовали две области, размещенные в структурах принципиально разного строения. Восточная область приурочена к долинам рек Барлык и Эльдиг-Хем, а Западная проходит через вершины хребта с высшей точкой г. Барлык. Уникальным в развитии очаговой области является ее тройственная площадная структура.

Развитие очаговой области Цаган-Шибэтинского землетрясения во времени (рис.8) происходит в виде неоднократных активизаций, которые не укладываются в затухание сейсмичности по закону Омори. Для Цаган-Шибэтинского землетрясения значимой особенностью является наличие форшоковой активности.

Сейсмичность стыка Алтае-Саянской горной области с Байкальской рифтовой зоной развивается в соответствии с блоковым строением. Важными элементами этой зоны является Тувино-Монгольский блок и примыкающий к нему блок, являющийся частью Саяно-Тувинского блока. Блоковая система с активизированными границами особенно ярко видна на картах суммарной сейсмической энергии и плотности очагов землетрясений. В сейсмоактивных участках граней блоковой структуры находятся крупные землетрясения с их афтершоковыми процессами и продолжающимися активизациями: Бусингольское 1991 г., $M_S=6.5$; Белин-Бий-Хемское 2008 г., $M_w=5.7$; Тувинские: 2011 г., $M_L=6.7$ и 2012 г., $M_L=6.8$; Хубсугульское землетрясение 2021 г., $M_L=6.9$. На границах Тувино-Монгольского блока с юга происходили Таннуольские землетрясения 1905 г. с магнитудой около 8.

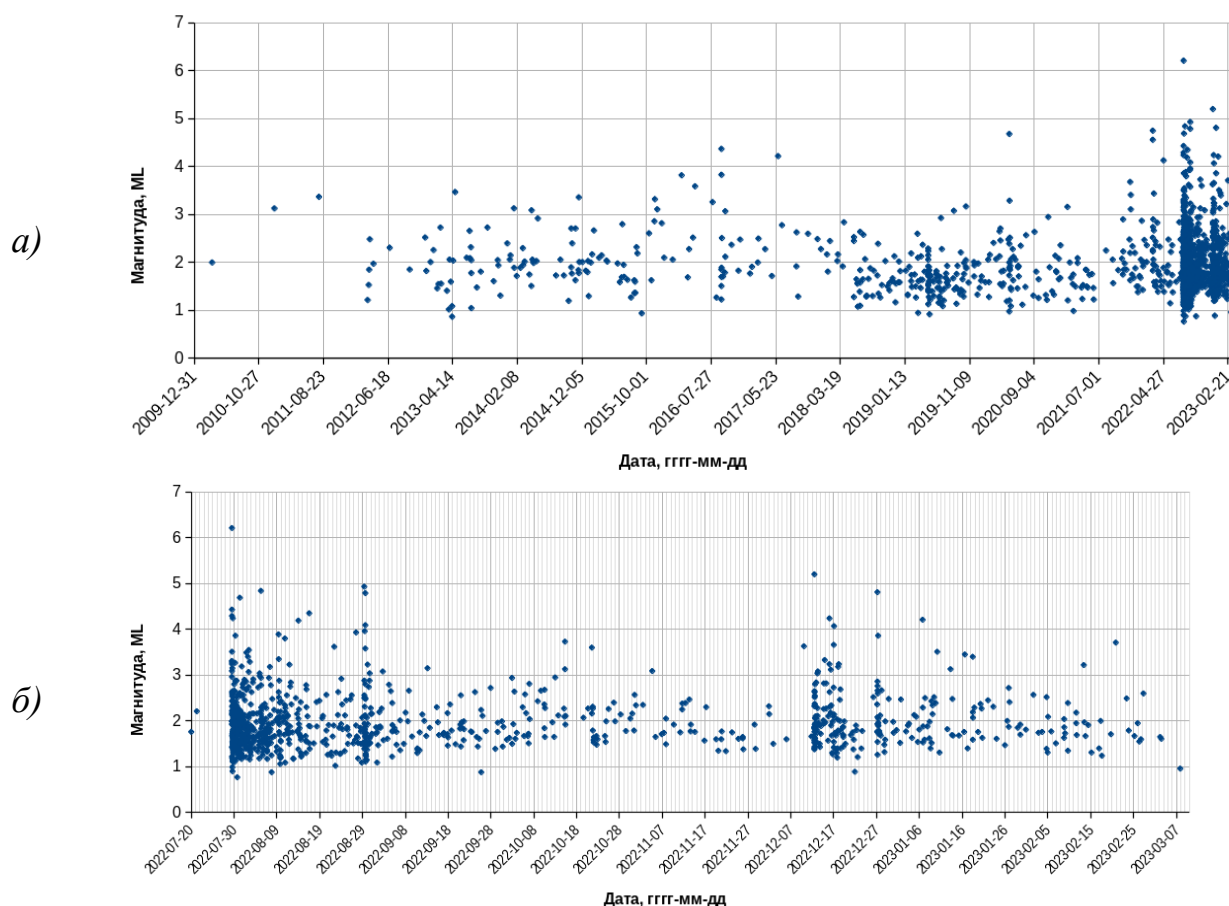


Рисунок 8 – Развитие во времени сейсмичности очаговой области Цаган-Шибэтинского землетрясения 29.07.2022 с $M_L=6.2$: а – развитие с 2009 по 2023 гг., б – развитие с 20.07.2022 по 07.03.2023

Тувинские землетрясения, произошедшие на Каахемском глубинном разломе, исследованы с временной сетью станций, позволяющей с высокой точностью определять параметры гипоцентров афтершоков. Карта плотности афтершоков

Тувинских землетрясений указывает на особенности тектонического процесса в очаге (Рисунок 9).

Тувинское-I землетрясение 27.12.2011, обусловленное правосторонним сдвигом вдоль Каахемского разлома, сформировало афтершоковую область, преимущественно распространившуюся к югу до северного окончания хребта Ыдык и ограниченную с севера зоной поворота Каахемского разлома. Глубина события – 17 км, и афтершоки происходили на двух участках: один – над эпицентром главного события на глубинах от 10 до 17 км, а другой представлен полосой в разрезе на глубинах до 10 км с медленным уменьшением глубин афтершоков к югу.

Тувинское-II землетрясение (глубина 9 км, взброс) изменило структуру афтершокового процесса. Во-первых, оно произошло за краем наиболее активного участка афтершоков декабрьского события; во-вторых, очаг Тувинского-I землетрясения локализуется с краю от наиболее активизированной области после Тувинского-II землетрясения, в-третьих, полоса событий с глубинами менее 10 км ослабла с севера и продвинулась к югу. После Тувинского-I землетрясения 2011 г. активизировалась узкая зона Каахемского разлома, а после Тувинского-II землетрясения 2012 г. активизировались грани клинообразного окончания хребта Ыдык. Глубины афтершоков во многих случаях достигли 30 км.

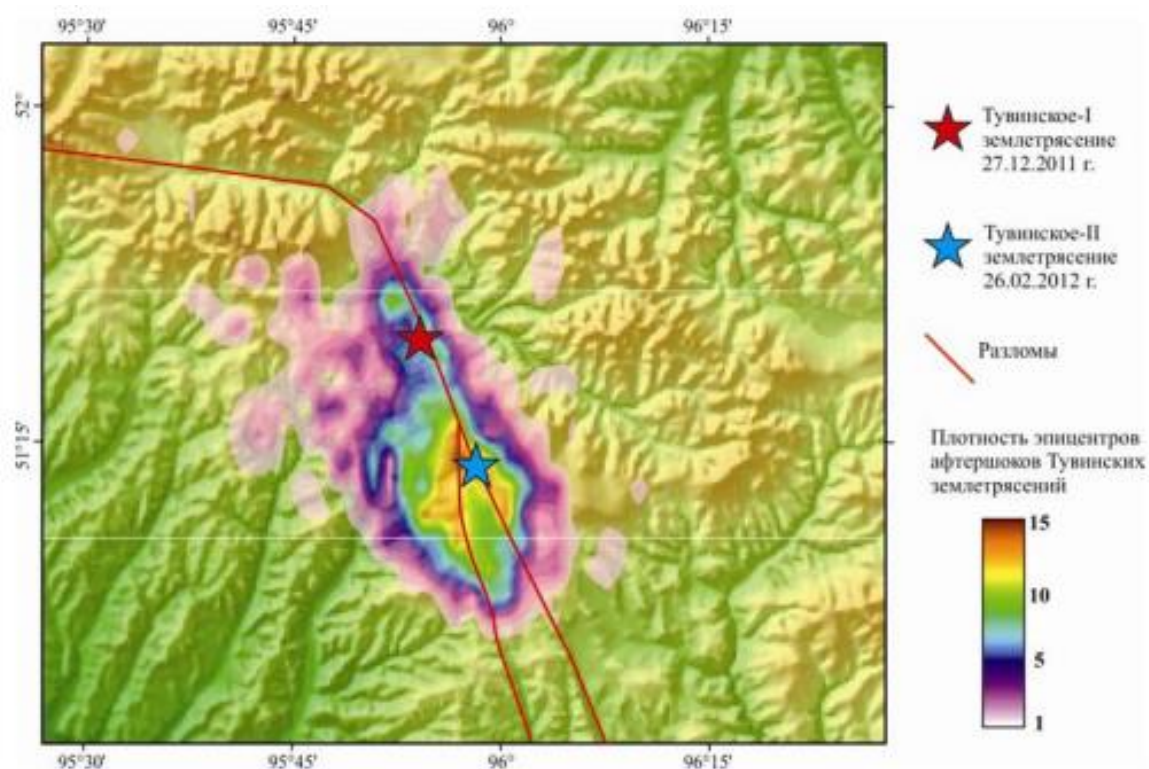


Рисунок 9 – Карта плотности эпицентров афтершоков Тувинских землетрясений

Ведущую роль в создании напряженного состояния в эпицентральной зоне Тувинских землетрясений сыграл процесс медленного выдавливания клинообразного хребта Ыдык к Северу. Афтершоковые процессы двух

землетрясений сливаются, и это отражает единство тектонического процесса для них.

Бусингольское землетрясение 27.12.1991 ($M_S=6.5$), произошедшее на оперяющем разломе (для Бусингольского идущего вдоль впадины) и уходящем в Шишхидское нагорье. Главная особенность – пульсирующий характер активизации.

Пульсации активности делают активизацию уникальным явлением. Наличие смещений пульсаций по разлому (Рисунок 10) позволяет делать вывод, что мы имеем дело с пространственным изменением очаговой области землетрясения. В изучении афтершоков выделялось такое понятие, как афтершоки развития [Шебалин, 1997; Арефьев, 2003]. В данном случае крупное землетрясение привело к активизации разломной структуры, длящейся десятилетия, что не укладывается в рамки традиционных представлений об афтершоковых последовательностях. В 2009 г. произошло изменение режима сейсмичности очаговой области. Район по-прежнему характеризуется высокой сейсмичностью, но кратковременные пульсации активности сменили более плавные вариации.

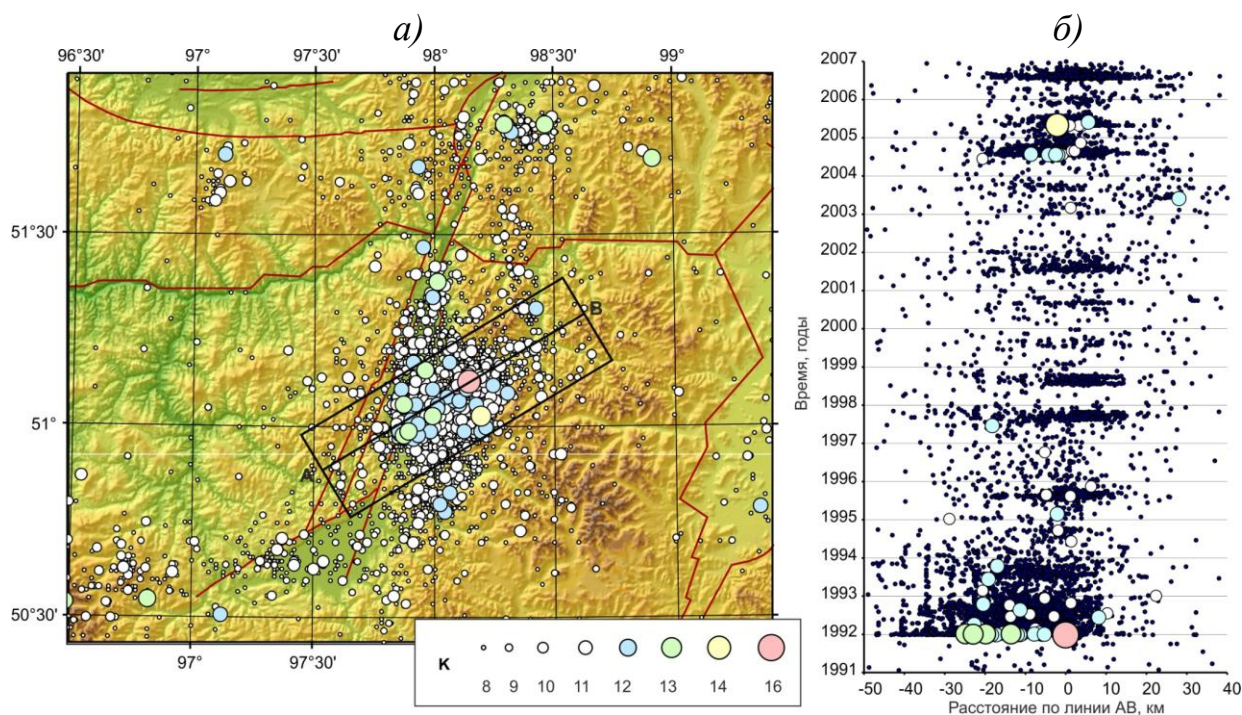
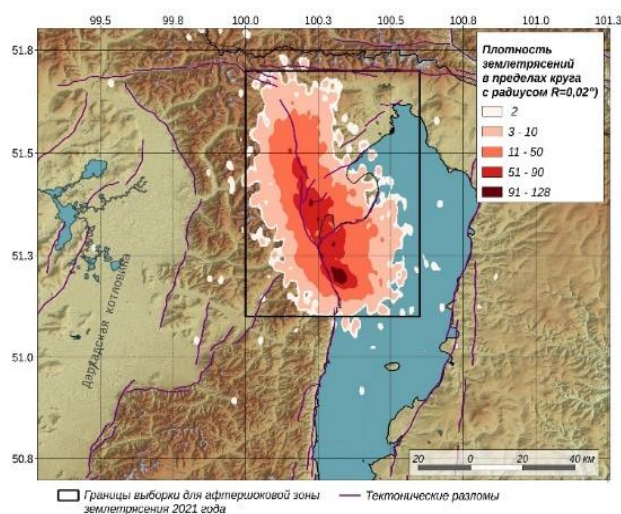


Рисунок 10 – Развитие сейсмического процесса в очаге Бусингольского землетрясения 1991 г. а – карта эпицентров землетрясений района Бусингольского землетрясения; б – пространственно-временное развитие афтершокового процесса вдоль оперяющего разлома. Снос событий выполнен на центральную линию прямоугольника (см. рисунок а)

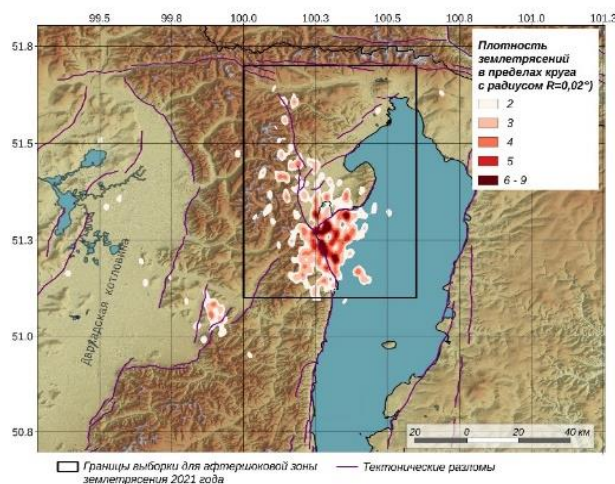
Белин-Бий-Хемское землетрясение 2008 г. ($M_w=5.7$) является крупнейшим событием около Белинской впадины. Оно произошло на оперяющем разломе у границы Тувино-Монгольского блока и на грани блока меньшего ранга с вращением как результата взаимного проникновения разных тектонических режимов.

Хубсугульское землетрясение 12.01.2021 ($M_L=6.9$), глубина очага 8 км, произошло на восточной границе Тувино-Монгольского блока и вызвало интенсивный афтершоковый процесс. До этого землетрясения в районе озера Хубсугул сильнейшим было Хубсугульское землетрясение 05.12.2014 $M_L=5.2$. Обработка данных временной сети станций в Прихубсугулье, работавшей в двухлетний период с 2014 по 2016 гг., выполненная с использованием программ искусственного интеллекта при участии автора, позволили получить высокоточные и более представительные данные о структуре сейсмичности в данном районе до 2021 года. Очаговая область Хубсугульского землетрясения 2014 г. находится восточнее очага землетрясения 2021 г. и является активизацией иных разломов.

2021



2022



2023

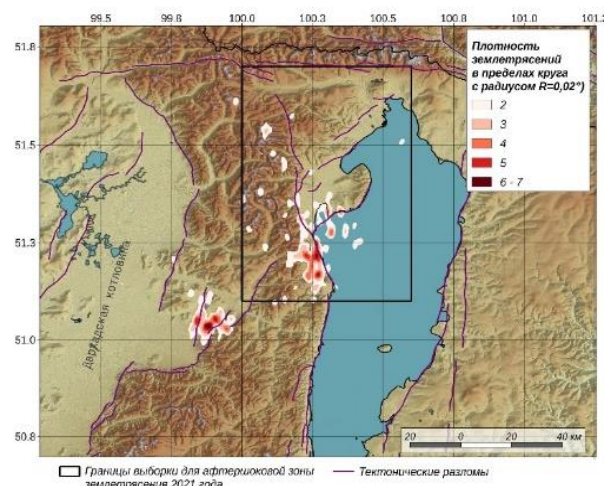


Рисунок 11 – Карты плотности землетрясений в Прихубсугулье по годам.

Сейсмологические исследования выполнялись по сети станций Алтае-Саянского и Байкальского филиалов ЕГС РАН и сети станций Монголии. На Рисунке 11 представлены карты плотности афтершоков Хубсугульского землетрясения 2021 г. с крупными афтершоками в соответствии с временными интервалами. Выделение сейсмической энергии из афтершоковой области

Хубсугульского землетрясения преимущественно трехактный процесс. Следом за главным событием произошло пять афтершоков с $M_L > 5.8$ и только один афтершок с $M_L > 6$. Значимый вклад в выделение энергии внесли афтершоки 31.03.2021 с $M_L = 6.2$ и 03.05.2021 с $M_L = 6.4$. Самый сильный афтершок произошел позднее главного толчка почти на четыре месяца.

В структуре разломов эпицентральной области мы имеем угол между двумя разломами, один направлен в северо-западном направлении от точки пересечения разломов у озера, а второй – от этой точки в северо-восточном направлении. Вероятно, существует на северо-западе Хубсугула угловой сегмент с уже раздробленной разломами внутренней структурой. Главное событие произошло в озере на разломе с северо-восточным простираем. Развитие афтершокового процесса наиболее активно пошло в северо-западном направлении.

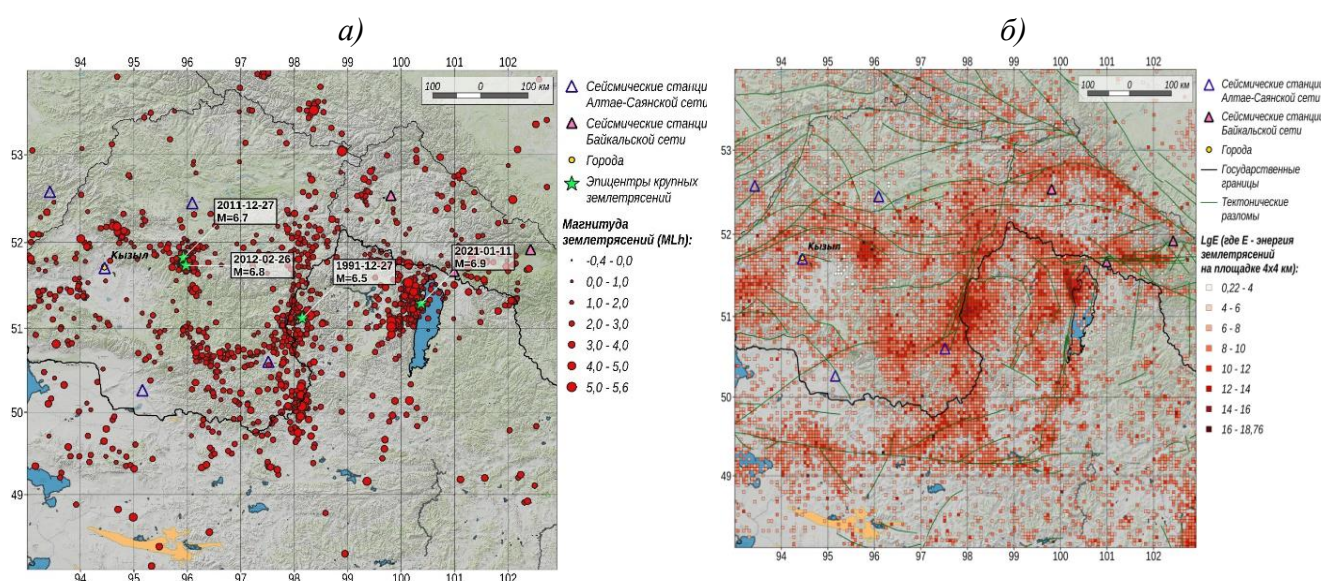


Рисунок 12 – Блочная структура Восточной Тувы и Западного Прибайкалья. *а* – Карта суммарной сейсмичности за 1985-2023 гг. *б* – Карта эпицентров землетрясений в 2023 г.

Хубсугульское землетрясение 2021 года вызвало повышение активности граней блочной структуры региона, что значительно отличает его влияния на сейсмичность от воздействия Чуйского землетрясения на Алтай. Новой активизацией после землетрясения явился Дархадский рой землетрясений.

На Рисунке 12 представлена карта эпицентров землетрясений за 2023 г. Это относительно небольшой интервал времени, однако, основные элементы блоковой структуры хорошо определяются по положению эпицентров. Наиболее активные элементы структуры, где расположены очаговые области Хубсугульского землетрясения 2021 г. с $M_L = 6.9$, Тувинских 2011 г. с $M_L = 6.7$ и 2012 г. с $M_L = 6.8$, и Бусингольского 1991 г. с $M_s = 6.5$. Сейсмические активизации Восточной Тувы и ее границы с Байкальской рифтовой зоной сосредоточены у границ блоков, и этим данный район существенно отличается от Горного Алтая. Хубсугульское землетрясение активизировало короткий отрезок разлома. После Хубсугульского землетрясения очаговые области сильных землетрясений блочной структуры

рассматриваемого района активизировались и продолжают быть сейсмически активными, что существенно отличается от эволюции сейсмичности Алтая после Чуйского землетрясения 2003 г. Активизирована вся блочная структура. Влияние крупного землетрясения на сейсмичность данного района возможно соответствует модели шевеления блоков.

Результаты главы 3

1. В Алтае-Саянской области установлены различия в развитии сейсмотектонических процессов для трёх областей: Алтая; Западного-Саяна и хр. Академика Обручева; Тувино-Монгольского блока.

2. На Алтае в очаговой области Чуйского землетрясения 2003 года сформировалась объёмная структура сейсмически активизированных разломов и горизонтальных слоёв. Эпицентр не является узловой точкой пересечения крупных разломов. Магистральную линию афтершокового процесса неоднократно пересекают разломные зоны. Участки пересечения разломов менее сейсмичны, чем участки прохождения разрывом целиковых зон. Вдоль магистрального разрыва ширина полосы афтершоков меняется от 1–2 до 10 км. Блочная структура среды вдоль магистрального разлома отражается в развитии оперений и разветвлений в структуре сейсмически активизированных разломов.

3. Чуйское землетрясение 2003 года оказало заметное влияние на развитие сейсмичности Алтая в последующие годы. До 2008 года наблюдается доминирование в сейсмичности региона событий в эпицентральной области Чуйского землетрясения. В последующие годы формируется повышенная сейсмическая активность в смежных геологических структурах: с 2010 по 2021 гг. активизируются некоторые структуры на удалениях 250–300 км от эпицентра Чуйского землетрясения в разных направлениях от него.

4. Район сочленения структур Алтае-Саянской складчатой зоны и Байкальских впадин в сейсмичности выделяется как структура с повышенной сейсмичностью около границ блоков. После Хубсугульского землетрясения 2021 г. повышенной сейсмической активностью обладает та же блочная структура, что и в предыдущие годы, с активизацией эпицентральных зон Бусингольского землетрясения 1991 г., Тувинских землетрясений 2011–2012 гг. и других структур, сейсмически активных до 2021 г. Новым является возникновение после 2021 года Дархадского роя землетрясений. Взаимодействие сейсмичности разных очаговых областей может рассматриваться как результат шевеления блочной структуры.

5. Для Западного-Саяна и хр. Академика Обручева установлено, что наиболее сильные землетрясения связаны с поперечными разломами в этих структурах и с процессами неравномерного выдвижения блоков Тувинской котловины и Тувинского нагорья к Северу.

Глава 4. Наведенная сейсмичность в Западной Сибири

Автор принимал активное участие в формировании сети сейсмологических станций Кузбасса (17 стационарных станций) и в проведении экспериментов с временными станциями. Представительная регистрация сейсмических событий по стационарным станциям осуществлялась с энергетического класса $K_p=5$ или магнитуды $M_L=1.5$. В Кузбассе большая часть станций – во впадине около угольных разрезов, что дает возможность с повышенной точностью контролировать наведенную сейсмичность.

С 2014 по 2020 гг. идет плавное увеличение количества взрывов в Кемеровской области от 5868 в 2014 г. до 9314 в 2019 г. Изменение числа взрывов и землетрясений – два не связанных процесса.

На Рисунке 13 выделяются несколько сейсмических активизаций, превышающих фон наведенной сейсмичности в Кемеровской области: первая активизация – июнь 2014 г., приурочена к Бачатскому угольному разрезу; вторая активизация – в марте 2017 г., соответствует активизации Калтанского угольного разреза и шахты «Алардинская»; третья – в мае 2018 г. и четвертая – в сентябре 2018 г. – активизации того же района; пятая активизация – июль-август 2019 г. – в Горной Шории. Сейсмические активизации кратковременные и доминирующие как по числу событий, так и по энергии над общим фоном сейсмичности. При этом один и тот же участок (разрез, шахта) активен в виде серии кратковременных активизаций.

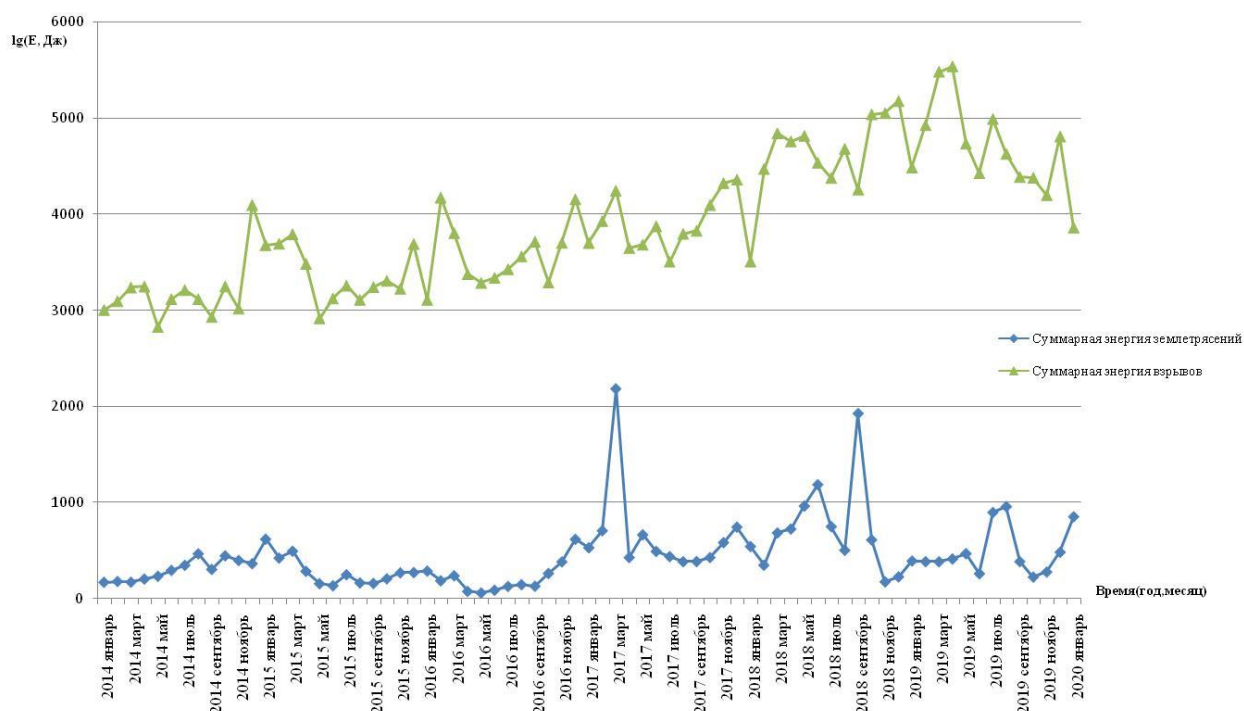


Рисунок 13 – Изменение суммарной сейсмической энергии в Кемеровской области с 2014 по 2020 гг. Каждая точка – величина суммарной энергии за месяц

Сейсмический режим в Кемеровской области испытывает постоянные изменения во времени и пространстве. На Рисунке 14 видно, что повышенная

сейсмичность формируется в виде пятен около горных выработок, как подземных, так и около разрезов. Шахт и разрезов в Кузбассе существенно больше, чем мы видим активизаций. Наведенная сейсмичность развивается как нестационарный процесс с изменением сейсмической активности во времени и пространстве. Активизации протекают как кратковременный процесс в один-два месяца.

С временными сетями станций сильные активизации изучались в районе разреза Бачатский, в районе разреза «Калтанский» с активизированной шахтой «Алардинская», в районе шахт около г. Полысаево, около шахты им. Кирова, около предприятий Распадской угольной компании и др.

Рисунок 15 показывает роль временной сети станций в изучении наведенной сейсмичности. Временная сеть выставлена в июле 2022 года. В районе Распадской-Коксовой шахты регистрировались землетрясения начиная с $M_L=2$, а с временной сетью с $M_L \geq 0$. Эксперименты проводились с числом временных станций от единиц до нескольких десятков. Большое количество станций применялось для высокоточного определения глубин землетрясений с магнитудой $M_L \geq 0$.

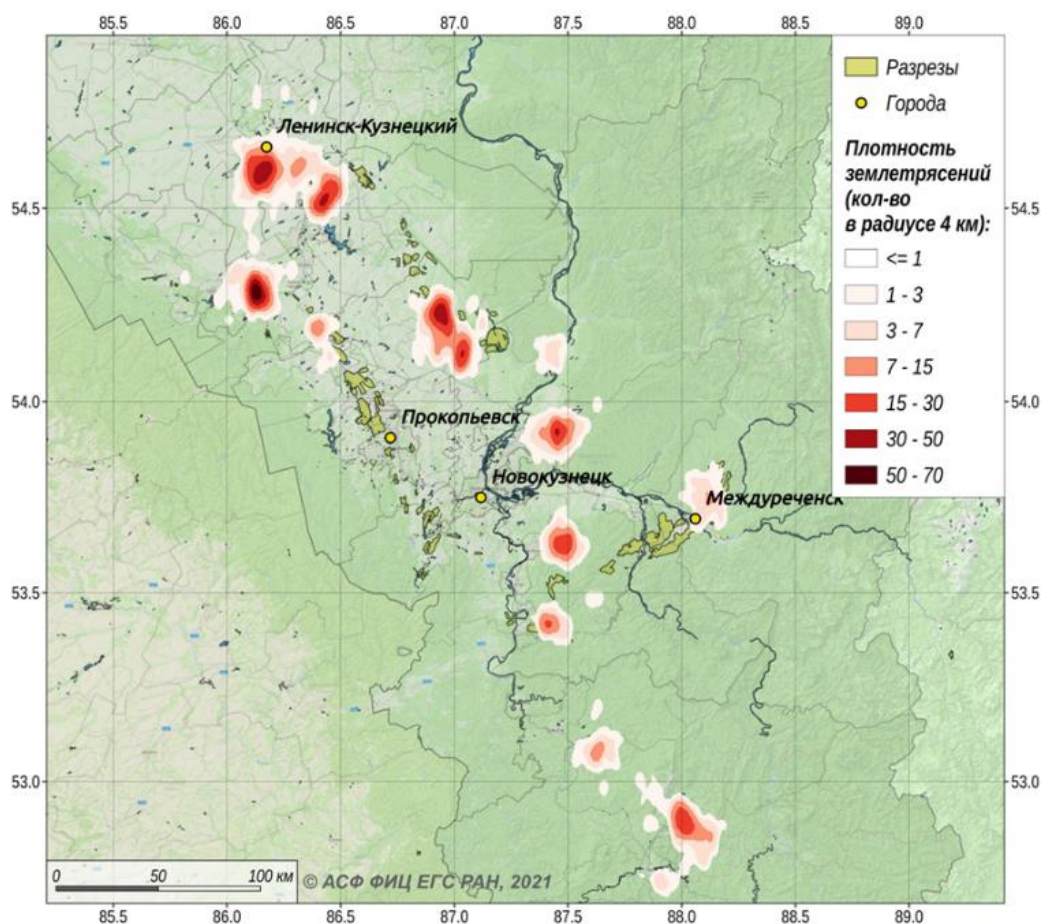


Рисунок 14 – Карта плотности землетрясений Кузбасса и Горной Шории (с 01.05.2020 по 23.05.2021)

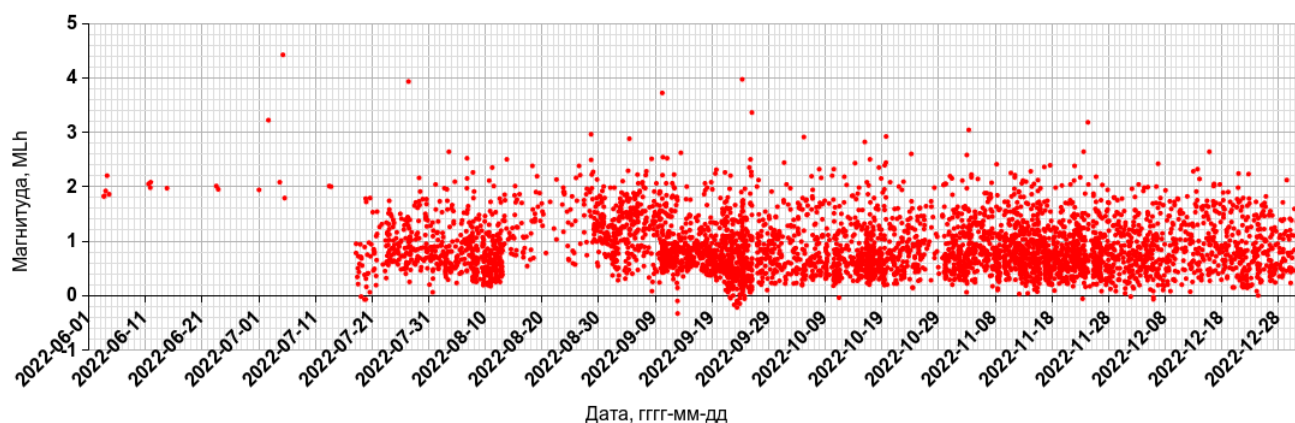


Рисунок 15 – Диаграмма распределения землетрясений в районе горных работ АО «Распадская-Коксовая» в плоскости «время-магнитуда» в 2022 году

Техногенные землетрясения в районе подземных горных выработок в большинстве случаев происходят в районе забоя с активизацией недр на глубины до 1-2 км и при смещении облака событий вслед за движением лавы. Максимальные магнитуды $M_L < 3.5$. Механизм очага преимущественно взбросовый. Наибольшим триггерным эффектом в развитии наведенной сейсмичности обладает вибрация от работающего оборудования лав.

Установлен факт существования в Кузбассе блуждающей наведенной сейсмичности в районах, где ранее велась подземная добыча угля. В районе г. Полысаево активизировались недра на глубинах 2-5 км, а в районе около шахты им. С.М. Кирова зарегистрирована блуждающая сейсмичность на малых глубинах 100-200 м. Развитие блуждающей сейсмичности может происходить как релаксация созданных когда-то в среде напряжений под горными выработками и как процесс разрушения среды над завершившими свою работу выработками.

Наиболее сильные землетрясения происходят в районе больших разрезов (Бачатское землетрясение, $M_L = 6.1$, Талдинское, $M_L = 5.6$). Наведенная сейсмичность открытых выработок формируется под ними или под отвалами. Сейсмические события происходят на глубинах от ложа до 4-6 км. Установлен факт несоответствия модели напряженного состояния района Бачатского разреза, восстановленного по механизмам афтершоков, механизму главного толчка Бачатского землетрясения. В результате сильного техногенного землетрясения, имевшего характерный размер очага порядка 10 км, произошла кардинальная перестройка всего поля напряжений в районе разреза. Сейсмический режим техногенной активизации около разреза «Бачатский» непрерывен и не стационарен: выделяются периоды фонового уровня сейсмичности, пониженного по энергии сильнейших землетрясений и разреженной частотой слабых событий, и периоды активизаций с сильными и крупными землетрясениями и увеличенной частотой слабых событий. Пульсирующий характер сейсмической активности недр разреза, вероятно, связан с сильным техногенным воздействием при добыче угля, обеспечивающим изменение напряженного состояния недр.

С использованием временной сети станций в очаговой области Бачатского землетрясения изучена объемная структура сейсмической активизации, выполнен мониторинг сейсмической активности и по механизмам очагов землетрясений

восстановлено напряженное состояния недр. Зарегистрировано более 5000 землетрясений. Глубина гипоцентра Бачатского землетрясения – 4 км. Глубины афтершоков составляют от 6 км до ложа разреза. Наиболее крупные землетрясения с $M_L=3.5-4.0$ концентрируются на юге разреза, где и произошло главное событие.

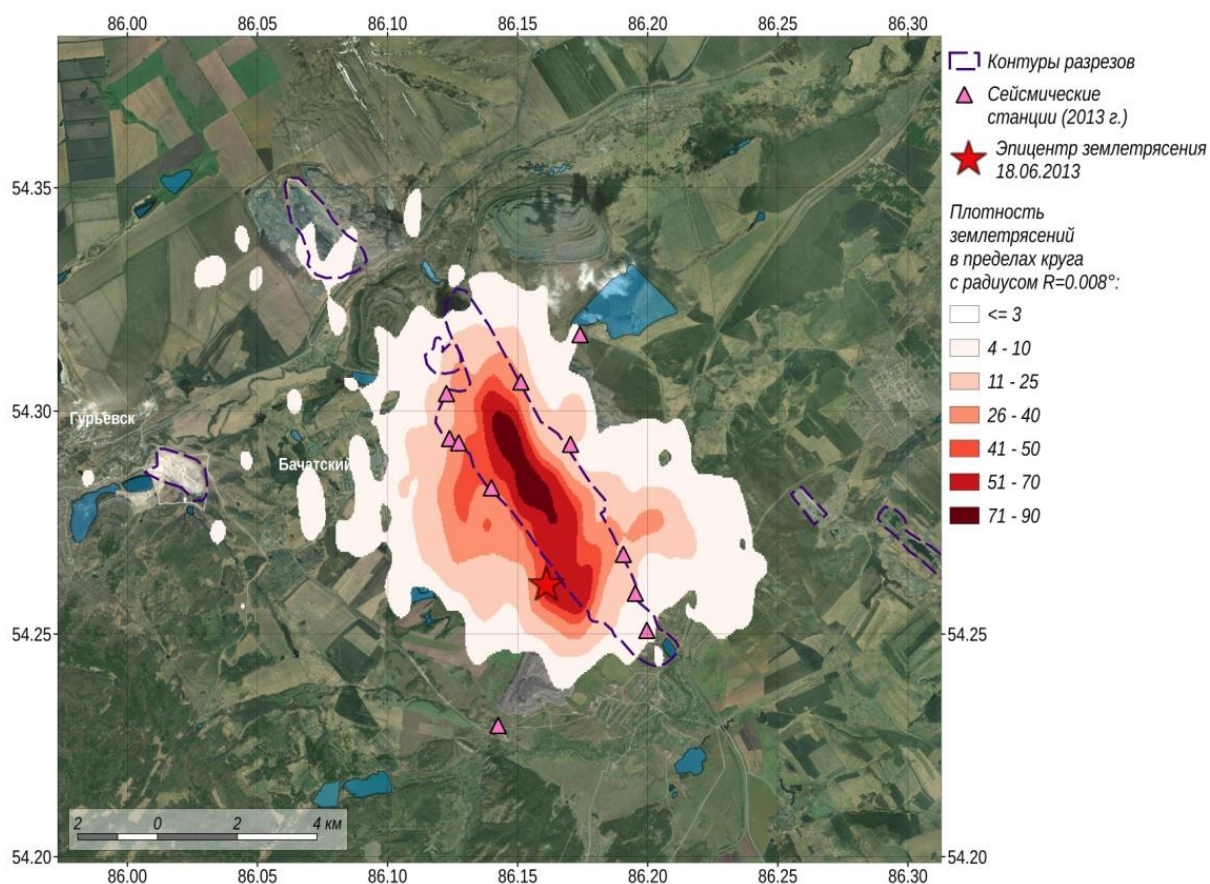


Рисунок 16 – Афтершоки Бачатского землетрясения. Карта плотности землетрясений 18.06 2013 по 12.12.2020

На Рисунке 16 дана карта плотности афтершоков Бачатского землетрясения. Главное событие и большее количество крупных афтершоков приурочено к борту выработки, но в то же время максимальное число афтершоков происходит под выработкой. За пределами разреза повышенная плотность событий наблюдается под отвалами. Детально изучена объемная структура сейсмически активизированных недр. Поперек разреза сгущение афтершоков выглядит как наклоненная на северо-восток полоса. Угол наклона относительно вертикали примерно 9° . Основное количество сильных ($M_L \geq 3$) афтершоков происходит на глубинах 3-5 км.

Вдоль разреза на глубине около 4-х км наблюдается сгущение землетрясений, вытянувшееся на всю длину угольного разреза. На меньших и больших глубинах активизированная область сужается. В целом сейсмоактивная область выглядит как ромб с наиболее сейсмоактивной горизонтальной диагональю.

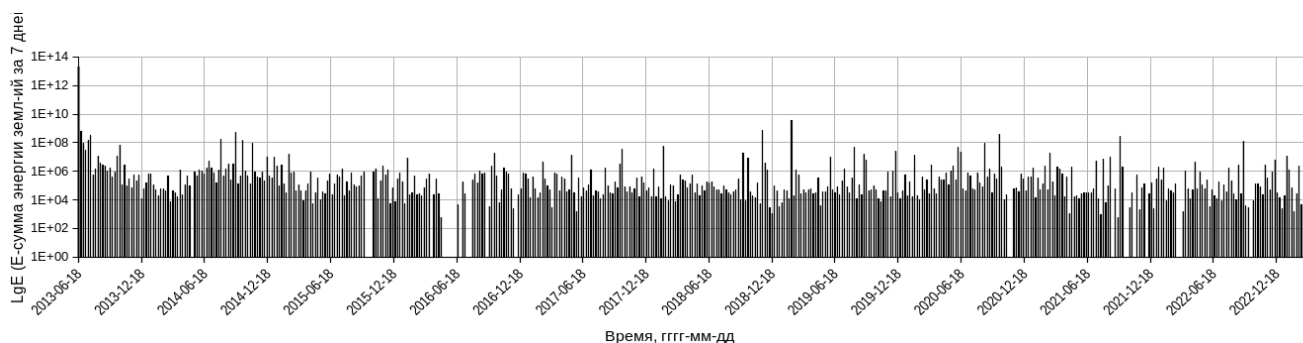


Рисунок 17 – Бачатское землетрясение: развитие сейсмического процесса во времени (длина вертикальной линии – суммарная энергия землетрясений за неделю)

После Бачатского землетрясения по суммарной энергии за неделю (Рисунок 17) не наблюдается затухания сейсмического процесса. С 2013 по 2022 годы среда испытывает постоянные структурные изменения из-за не прерывающейся добычи угля, что добавляет энергию в сейсмичность под разрезом.

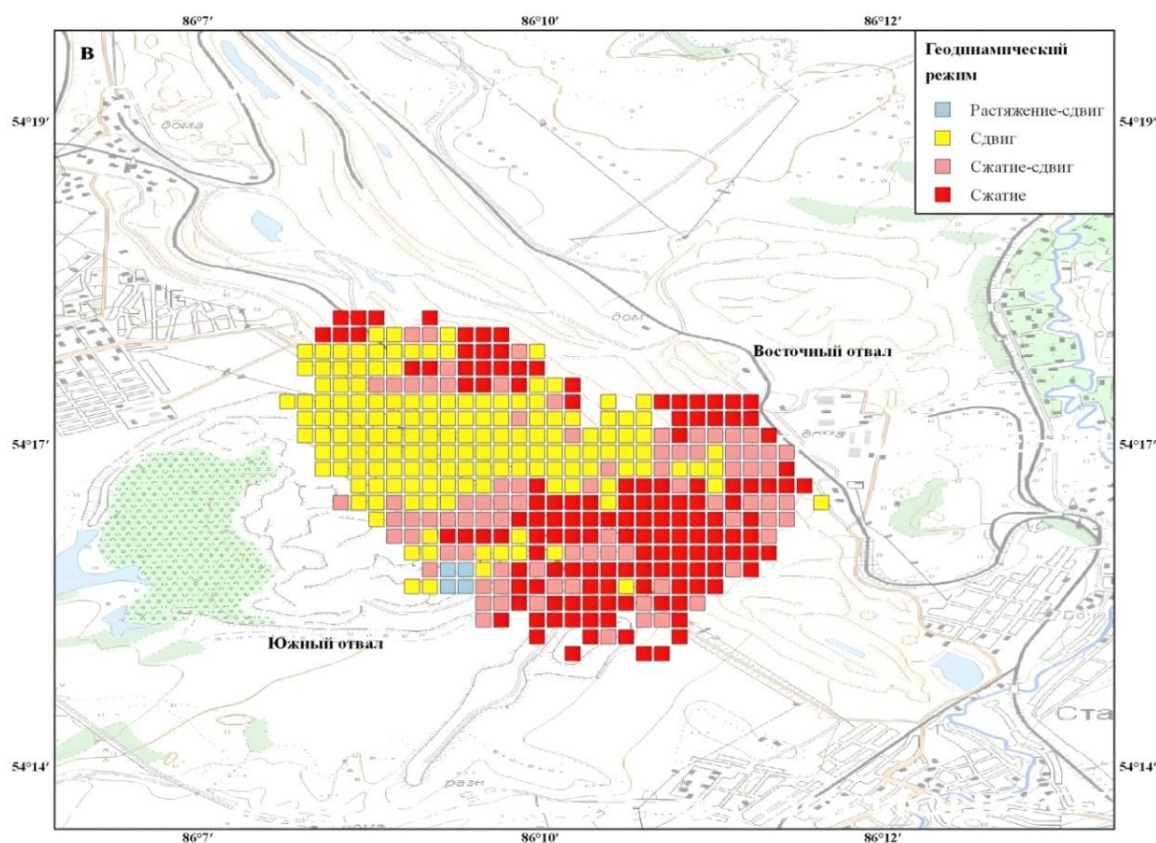


Рисунок 18 – Геодинамический тип напряженного состояния (желтый – горизонтальный сдвиг, красный – горизонтальное сжатие, светло красный – горизонтальный сдвиг со сжатием)

Расчеты напряженного состояния выполнялись по равномерной сетке 0.002×0.002 градуса. С использованием программы STRESSseism из каталога механизмов очагов создано 376 однородных выборок, для которых рассчитаны параметры тензора напряжений.

Обнаружено несовпадение ориентации оси главного сжатия снимаемых напряжений фокального механизма Бачатского землетрясения и осей главного

сжатия по результатам инверсии (Рисунок 18). Объяснение такого факта неоднозначно. В первом случае мы полагаем, что в результате сильного техногенного землетрясения, имевшего характерный размер очага порядка 10 км, произошла перестройка поля напряжений. Во втором случае – модель напряженного состояния для крупных землетрясений одна, а для землетрясений с меньшими магнитудами другая. Модель с иерархией напряженного состояния, теоретически обоснованная Осокиной в 1987 г. и экспериментально подтвержденная автором данной работы при изучении афтершоков Чуйского землетрясения 2003 года.

Интересные сейсмические активизации изучены в районах совместного воздействия на недра подземных и открытых горных выработок. В последнем квартале 2016 г. система мониторинга наведенной сейсмичности Кузбасса начала фиксировать усиливающуюся сейсмическую активность в районе Калтанского разреза, где произошла серия сейсмических событий, ощущавшихся в городах и поселках Кузбасса. С момента развертывания временной сети начала фиксироваться слабая сейсмичность в районе шахты «Алардинская», которая не была выявлена стационарной сетью. Изучено развитие двух сейсмических активизаций, сформировавшихся при совместном воздействии открытых и подземных горных выработок. Выделяются два очага техногенных землетрясений разного энергетического уровня. Одна сейсмическая активизация состоит из землетрясений с магнитудами (M_L) менее двух. Они сосредоточены на участке, соответствующем подземной добыче угля шахтой «Алардинская». Серия более крупных землетрясений соответствует открытым выработкам Калтанского разреза и развивается независимо от близкой к ней шахтной активизации.

Результаты главы 4

1. Наведенная сейсмичность в угольном Кузбассе, концентрируясь около горных выработок, развивается как нестационарный процесс с изменением сейсмической активности во времени и пространстве без синхронизации между отдельными активизациями.

2. В Горной Шории для трёх железорудных шахт (Таштагольская, Шерегешская, Казская) на расстояниях в десятки км друг от друга наблюдается эффект частичной синхронизации сейсмической активности во времени.

3. В районах подземных угольных шахт техногенные землетрясения происходят в районе забоя с активизацией недр на глубины до 1-2 км и при смещении облака событий вслед за движением лавы. Максимальные магнитуды $M_L < 3.5$. Механизм очага преимущественно взбросовый.

4. Наведенная сейсмичность открытых выработок формируется под ними или под отвалами на глубинах от ложа до 4-6 км. Крупнейшие землетрясения – Бачатское $M_L = 6.1$ и Талдинское $M_L = 5.6$. Механизмы очагов преимущественно взбросы.

5. Установлен факт несоответствия модели напряжённого состояния района Бачатского разреза, восстановленного по механизмам афтершоков, механизму главного толчка Бачатского землетрясения. Напряжённое состояние недр под

разрезом Бачатский, восстановленное по механизмам афтершоков, отличается от механизма главного события и подобно очаговой зоне Чуйского землетрясения подтверждает иерархическую модель напряжённого состояния для блочных сред теоретически обоснованной Д. Н. Осокиной.

6. Установлен факт существования в Кузбассе блуждающей наведённой сейсмичности в районах, где ранее велась подземная добыча угля. В районе г. Полысаево активизировались недра на глубинах 2÷5 км, а в районе около шахты «Им С.М. Кирова» зарегистрирована блуждающая сейсмичность на малых глубинах 100÷200м. Развитие блуждающей сейсмичности может происходить как релаксация созданных когда-то в среде напряжений под горными выработками и как процесс разрушения среды над завершившими свою работу выработками.

7. Развитие наведённой сейсмичности при совместном воздействии на недра подземных и открытых горных выработок в одном случае Калтанский угольный разрез и шахта Алардинская происходит как локальная активизация слабых событий под шахтой и окружающая её активизация из более крупных землетрясений в окрестностях открытых горных выработок. Развитие сейсмичности для каждого типа выработок соответствует характеристикам для шахт и для открытых выработок как независимых объектов. В другом случае для угольной шахты «Ерунаковская-8» и Ерунаковского поля Талдинского угольного разреза сформировалось единое поле сейсмичности в районе подработки шахтой отвалов разреза. В этом случае наблюдается развитие микросейсмичности с выходом на уровень землетрясений с $M_L \approx 4.0$ приводящих к авариям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы создан аппаратно-программный комплекс Алтае-Саянского центра сбора и обработки сейсмологической информации как для стационарных наблюдений, так и локальных экспериментов, работающий в автоматическом режиме с обработкой данных в реальном времени и с дальнейшим уточнением результатов, позволяющий непрерывно контролировать качество записей, поступающих в базу данных, оснащенный набором современных методов обработки сейсмологических данных, а также картографической и другой геолого-геофизической информацией, играющей важную роль в процессе интерпретации результатов обработки. Данный комплекс развивался и использовался как инструмент для высокоточного и быстрого решения сейсмологических задач, поставленных в первой главе, на большом объеме экспериментальных данных в последние два десятилетия.

В работе реализована многоуровневая по детальности и точности исследований система наблюдений, включающая в себя: 1. Региональную сеть станций (на сегодня 67 станций); 2. Экспериментальные полигоны: Алтайский (17 станций в Горном Алтае), Полигон изучения наведенной сейсмичности (Кемеровская и Новосибирская области, 27 станций); 3. Экспериментальные исследования временными сейсмическими сетями в очаговых областях крупных землетрясений, в районах особо важных промышленных объектов, в местах сильного техногенного воздействия на земную кору.

Проведенными экспериментами обеспечено изучение сейсмичности Алтае-Саянской горной области на новом уровне представительности, детальности и точности. Исследована объемная структура сейсмически активизированных разломов очаговых областей Чуйского землетрясения 2003 г. с $M_s = 7.3$ по более, чем 20 тыс. событий, Тувинских землетрясений 2011, 2012 гг. с $M_L = 6.7$ и 6.8, соответственно, более 5 тыс. событий, очаговой области Айгулакского землетрясения 2019 г. с $M_L = 5.6$ более 6 тыс. событий. Получены детальные сведения о Хубсугульском землетрясении 2021 г. с $M_L = 6.9$ и структуре сейсмичности стыка Алтае-Саянской горной области с Байкальской рифтовой зоной, в том числе получены детальные данные о сейсмичности Прихубсугулья в период Хубсугульского землетрясения 2014 г. с $M_L = 5.5$. Исследовано влияние крупных землетрясений Чуйского 2003 г. и Хубсугульского 2021 г. на сейсмичность всего региона. Установлено значимое различие во влиянии этих землетрясений на дальнейшее развитие сейсмичности региона. Чуйское землетрясение вызвало мощнейший афтершоковый процесс в очаговой области и ослабление сейсмичности всего Алтая с медленным усилением в последующие годы сейсмичности смежных структур с формированием новых очаговых зон, наиболее активной из которых является Айгулакская очаговая зона. Как последующее развитие, сформировались области повышенной активности на большом кольце от эпицентра Чуйского землетрясения. Исследования эпицентральной области Цаган-Шибетинского землетрясения 2022 г. с $M_L = 6.2$, сформировавшейся как новая активная зона на Восточном Алтае со сложным площадным строением, наличием форшоковой активности, развитием афтершокового процесса, не укладывается в рамки закона Омори и скорее соответствует логистическому уравнению [Гульельми и др., 2021], в соответствии с которым начальная часть развития во времени афтершокового процесса совпадает с законом Омори, а дальнейшее развитие происходит по более сложной схеме.

Хубсугульское землетрясение 2021 г., сформировав афтершоковую область на участке восточной границы Тувино-Монольского блока, развивается одновременно с активизацией областей, сформировавшихся ранее на других гранях блоковой структуры переходной области от Алтае-Саянской системы к Байкальской рифтовой зоне. Эволюция сейсмичности в этом регионе происходит по существенно иному сценарию, чем это имеет место на Алтае.

Детальные исследования сейсмичности Кузбасса выявили ее приуроченность к местам добычи полезных ископаемых. Изучены характеристики развития наведенной сейсмичности около открытых горных выработок, около подземных горных выработок, и получены интересные результаты в условиях одновременного воздействия на недра близко расположенных друг к другу подземной и открытой горных выработок. Множественными экспериментами доказано отсутствие влияния промышленных взрывов на зоны повышенной техногенной сейсмичности. Показано триггерное влияние вибрации от угольных комбайнов на интенсивность развития наведенной сейсмичности. Для железнорудных шахт Горной Шории

обнаружен эффект частичной синхронизации наведенной сейсмичности разных рудников, что указывает на природно-техногенный характер активизаций.

Развитие сейсмологии в Сибири следует ориентировать на дальнейшее усиление автоматизации сбора и обработки экспериментальных данных, дальнейшее развитие сетей станций, обеспечение комплексности наблюдений, расширение методов автоматической интерпретации результатов. Значимые резервы имеются в следующих направлениях:

- Дополнить программы искусственного интеллекта, имеющегося в центре, информацией о свойствах шумов и полезных волн, с целью применять их для обработки данных не только на экспериментах с временными станциями, но и для обработки по данным региональной сети станций. Внедрить взаимно-корреляционные методы для повышения точности взятия времен вступлений слабых волн в условиях интенсивного шума.
- Продолжить исследования скоростных моделей по продольным и поперечным волнам по всей территории Алтае-Саянской горной области с целью получить меняющиеся в пространстве скоростные модели и внедрить их в практику обработки с целью повышения точности координат гипоцентров землетрясений.
- Создать систему оценки сейсмической опасности для Алтае-Саянской горной области с обновлением во времени, во-первых, по природной сейсмичности, во-вторых, по техногенной сейсмичности с расчетом карт региона, изменяющихся во времени.
- Исследовать взаимосвязи в переходах от фоновой сейсмичности к крупным землетрясениям и к сейсмическим активизациям.
- Создать обновляющуюся базу данных физического состояния земной коры Алтае-Саянской горной области по данным сейсмологии.
- На основе высокоточных экспериментов с временными сетями станций обеспечить новый уровень представительности и точности с целью изучения физики развития сейсмических активизация и их связи с тектоническим строением очаговых областей.
- Продолжить высокоточное изучение наведенной сейсмичности и взаимосвязей в ее развитии с уровнем продолжающегося техногенного воздействия.

Основные публикации автора по теме диссертации

Основные статьи в журналах из перечня ВАК

1. Гольдин С.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Филина А.Г., **Еманов А.А.**, Новиков И.С., Высоцкий Е.М., Фатеев А.В., Колесников Ю.И., Подкорытова В.Г., Лескова Е.В., Ярыгина М.А. Чуйское землетрясение и его афтершоки // Доклады Академии наук. – 2004. – Т. 395, № 4. – С. 534-536.

2. **Еманов А.А.**, Лескова Е.В. Структурные особенности афтершокового процесса Чуйского (*Горный Алтай*) землетрясения // Геология и геофизика. – 2005. – Т. 46, № 10. – С. 1065-1072.
3. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Филина А.Г., Лескова Е.В. Пространственно-временные особенности сейсмичности Алтае-Саянской складчатой зоны // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8, № 1. – С. 49-64.
4. **Еманов А.А.**, Лескова Е.В. Строение эпицентральной зоны Чуйского (*Горный Алтай*) землетрясения по данным метода сейсмической томографии с двойными разностями // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9, № 1. – С. 45-50.
5. Лескова Е.В., **Еманов А.А.** Характер деформаций в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения (27 сентября 2003 г., $k = 17$, горный алтай) по данным анализа фокальных механизмов афтершоков // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9, № 1. – С. 51-56.
6. Лунина О.В., Гладков А.С., Новиков И.С., Агатова А.Р., Высоцкий Е.М., **Еманов А.А.** Сейсмогенные деформации и поля напряжений в разломной зоне Чуйского землетрясения 2003 г., $M_s=7.5$ (*Горный Алтай*) // Геотектоника. – 2006. – № 3. – С. 52-69.
7. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Филина А.Г., Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Рудаков А.Д. Общее и индивидуальное в развитии афтершоковых процессов крупнейших землетрясений Алтае-Саянской горной области // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9, № 1. – С. 33-44.
8. Новиков И.С., **Еманов А.А.**, Лескова Е.В., Баталев В.Ю., Рыбин А.К., Баталева Е.А. Система новейших разрывных нарушений Юго-Восточного Алтая: данные об их морфологии и кинематике // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49, № 11. – С. 1139-1149.
9. Lunina O.V., Gladkov A.S., Novikov I.S., Agatova A.R., Vysotskii E.M., **Emanov A.A.** Geometry of the fault zone of the 2003 $M_s = 7.5$ Chuya earthquake and associated stress fields, Gorny Altai // Tectonophysics. 2008. Т. 453. № 1-4. С. 276-294. Повтор п.10
10. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Лескова Е.В., Фатеев А.В., Семин А.Ю. Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 1. – С. 37-43.
11. **Еманов А.А.**, Лескова Е.В., Еманов А.Ф., Фатеев А.В. Элементы структуры и фазы развития афтершокового процесса Чуйского землетрясения // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 1. – С. 29-36.
12. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Лескова Е.В. Сейсмические активизации в Белино-Бусингольской зоне // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13, № S1. – С. 72-77.
13. Эпов М.И., Миронов В.Л., Чимитдоржиев Т.Н., Захаров А.И., Захарова Л.Н., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Фатеев А.В. Наблюдение просадок поверхности Земли в районе подземных угольных

- выработок Кузбасса по данным радиолокационной интерферометрии alos palsar // Исследование Земли из космоса. – 2012. – № 4. – С. 26-29
14. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Янкайтис В.В., Филина А.Г. Урэг-Нурское землетрясение 15.05.1970, $M_s=7.0$ (*Монгольский Алтай*), афтершоковый процесс и особенности современной сейсмичности эпицентральной области // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53, № 10. – С. 1417-1429.
15. Лескова Е.В., **Еманов А.А.** Иерархические свойства поля тектонических напряжений в очаговой области Чуйского землетрясения 2003 года // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 1. – С. 113-123.
16. Деев Е.В., Зольников И.Д., Гольцова С.В., Русанов Г.Г., **Еманов А.А.**, Гуськов С.А. Следы древних землетрясений в аллювии р. Катунь (Уймонская впадина, Горный Алтай) // Доклады Академии наук. – 2013. – Т. 449, № 5. – С. 558-563.
17. Деев Е.В., Зольников И.Д., Гольцова С.В., Русанов Г.Г., **Еманов А.А.** Следы древних землетрясений в четвертичных отложениях межгорных впадин центральной части Горного Алтая // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 3. – С. 410-423.
18. Лескова Е.В., **Еманов А.А.** Некоторые свойства иерархической модели напряженного состояния эпицентральной области Чуйского землетрясения 2003 г. // Физика Земли. – 2014. – № 3. – С. 92-102.
19. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Лескова Е.В., Селезнёв В.С., Фатеев А.В. Тувинские землетрясения 27.12.2011, $M_L=6.7$ и 26.02.2012, $M_L=6.8$ и их афтершоки // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 456, № 2. – С. 223 - 226.
20. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Фатеев А.В., Лескова Е.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г.) // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 2. – С. 41-46.
21. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Фатеев А.В., Лескова Е.В. Техногенное Бачатское землетрясение 18.06.2013 ($M_L=6.1$) в Кузбассе - сильнейшее в мире при добыче твердых полезных ископаемых // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2016. – Т. 43, № 4. – С. 34-60.
22. **Еманов А.А.**, Еманов А.Ф., Фатеев А.В., Лескова Е.В. Одновременное воздействие открытых и подземных горных работ на недра и наведенная сейсмичность // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2016. – Т. 43, № 4. – С. 34-60.
23. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Ворона У.Ю., Серёжников Н.А. Сейсмический эффект промышленных взрывов в Западной Сибири и наведенная сейсмичность // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2018. – Т. 45, № 4. – С. 5-14.
24. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Павленко О.В., Фатеев А.В., Куприш О.В., Подкорытова В.Г. Колыванское землетрясение 09.01.2019 с $M_L=4.3$ и особенности наведенной сейсмичности в условиях Горловского

- угольного бассейна // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2019. – Т. 46, № 4. – С. 29-45.
25. **Еманов А.А.**, Еманов А.Ф., Фатеев А.В. Мониторинг сейсмической активизации в районе Калтанского разреза и шахты Алардинская (Кузбасс) // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2019. – Т. 46, № 3. – С. 5-15.
26. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г., Куприш О.В. Наведенная сейсмичность в угольных и железорудных районах Кузбасса // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 3. – С. 88-96.
27. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Фатеев А.В., Соловьев В.М., Шевкунова Е.В., Гладышев Е.А., Антонов И.А., Корабельщиков Д.Г., Подкорытова В.Г., Янкайтис В.В., Елагин С.А., Сережников Н.А., Дураченко А.В., Артемова А.И. Сейсмологические исследования на территории Алтае-Саянской горной области // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 2. – С. 20-51.
28. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Фатеев А.В. Сейсмотектоника активизированной объемной структуры разломов: результаты исследования строения верхнекоревой очаговой области Чуйского землетрясения $M_s=7.3$, произошедшего 27 сентября 2003 г. в Горном Алтае (Россия) // Геотектоника. – 2021. – № 2. – С. 94-104.
29. **Emanov A.A.**, Emanov A.F., Rebetsky Y.L., Kuprish O.V., Fateev A.V., Shevkunova E.V. Induced Seismicity of the Bachat Coal Mine and the Stress State of the Earth's Crust // Journal of Volcanology and Seismology. – 2021. – Vol. 15, №. 6. – P. 435–444.
30. **Еманов А.А.**, Еманов А.Ф., Левичев Е.Б., Соловьев В.М., Чуркин И.Н., Корабельщиков Д.Г., Синяткин С.В., Янкайтис В.В., Пиминов П.А., Бах А.А., Баранов Г.Н., Фатеев А.В., Карюкина К.Ю., Полянский П.О., Дураченко А.В., Сережников Н.А., Гладышев Е.А., Арапов В.В., Шевкунова Е.В., Антонов И.А., Ершов Р.А. Изучение сейсмических воздействий на площадку строительства ЦКП "СКИФ" // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2022. – Т. 49, № 3. – С. 5-38.
31. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Чечельницкий В.В., Шевкунова Е.В., Радзиминович Я.Б., Фатеев А.В., Кобелева Е.А., Гладышев Е.А., Арапов В.В., Артёмова А.И., Подкорытова В.Г. Хубсугульское землетрясение 11.01.2021 с $M_W=6.7$, $M_L=6.9$ и афтершоки начального периода // Физика Земли. – 2022. – № 1. – С. 67-82.
32. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Фатеев А.В. Устойчивые структуры афтершоков Чуйского землетрясения 2003 года // Геология и геофизика. – 2022. – № 1. – С. 87-101.
33. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Чечельницкий В.В., Шевкунова Е.В., Фатеев А.В., Кобелева Е.А., Арапов В.В., Фролов М.В., Хубсугульское землетрясение 12.01.2021, $M_L=6.9$ в структуре сейсмичности Тувино-Монгольского блока // Физика Земли. – 2023. - № 5. – С. 79-95.

34. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Гладышев Е.А. Эволюция сейсмичности Алтая после Чуйского землетрясения 2003 г. // Вулканология и сейсмология. – 2023. – № 6. – С. 26-40.
35. **Еманов А.А.**, Еманов А.Ф., Шевкунова Е.В., Фатеев А.В., Ребецкий Ю.Л. Объемная структура афтершоковой области Бачатского землетрясения (Кузбасс) и напряженное состояние недр под разрезом // Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64, № 12. – С. 1742 – 1750.
36. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Виноградов Ю.А., Чечельницкий В.В., Шевкунова Е.В., Фатеев А.В., Полянский П.О., Кобелева Е.А., Бах А.А., Серёжников Н.А. Оценка уровня и спектральных характеристик сейсмических воздействий на районы гидроэнергетики в Сибири // Геофизические процессы и биосфера. – 2024. – Т. 23, № 1. – С. 5-38.
37. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Новиков И.С., Гладышев Е.А., Фатеев А.В., Полянский П.О., Шевкунова Е.В., Ершов Р.А., Арапов В.В., Кривов А.А. Айгулакская очаговая область как результат воздействия Чуйского землетрясения 2003 г. на Горный Алтай // Геология и геофизика. – 2024. – Т. 65, № 11. – С. 1630 – 1646.
38. Еманов А. Ф., **Еманов А. А.**, Чечельницкий В. В., Шевкунова Е. В., Фатеев А. В., Кобелева Е. А., Полянский П. О., Фролов М. В., Ешкунова И. Ф. О влиянии Хубсугульского землетрясения 2021 года на сейсмичность стыка Алтае- Саянской горной области с Байкальской рифтовой зоной // Вулканология и сейсмология. – 2024. – № 6. – С. 28-39.
39. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Шевкунова Е.В., Гладышев Е.А. Цаган-Шибэтинское землетрясение 29.07.2022 с $M_L=6.2$ и положение очаговой области в западном горном обрамлении Тувинской котловины // Геология и геофизика. – 2025. – Т. 66. №6. – С. 803-810.

Монографии

1. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Лескова Е.В., Колесников Ю.И. Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействия на объекты недропользования / Отв. Ред. М.Д. Новопашин. – Новосибирск: Изд. СО РАН, 2008. – Разд. II Геодинамические и техногенные процессы в сейсмичности Алтае-Саянской горной области. – С. 176-265.
2. Еманов А.Ф., **Еманов А.А.**, Лескова Е.В., Фатеев А.В. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного землетрясения / Отв. Ред. Н.Н. Мельников. – Новосибирск: Изд. СО РАН, 2012. – Разд. V. – Гл. 2. Экспериментальное исследование наведенной сейсмичности в Кузбассе. – С. 426-457.
3. **Еманов А.А.**, Еманов А.Ф., Новиков И.С., Фатеев А.В., Лескова Е.В. Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горно-технических и природных системах / Отв. Ред. Н.Н.

- Мельников. – Новосибирск: Изд. СО РАН, 2018. – Т. 1. – Гл. 7.2. Оценка сейсмической опасности территории Кузбасса. – С. 400-417.
4. **Еманов А.А.**, Еманов А.Ф., Фатеев А.В., Ситников В.В., Лескова Е.В., Корабельщиков Д.Г., Дураченко А.А. Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горно-технических и природных системах / Отв. Ред. Н.Н. Мельников. – Новосибирск: Изд. СО РАН, 2018. – Т. 1. – Гл. 7.3. Мониторинг наведенной сейсмичности в Кузбассе. – С. 418-439.