

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

комиссии диссертационного совета 24.1.087.02
для принятия к защите диссертации Еманова Алексея Александровича
**«Закономерности развития природной и наведенной сейсмичности в
Алтае-Саянском регионе по данным плотных сейсмических сетей»**
по специальности 1.6.9 – «геофизика»
на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Объектом исследования в диссертации А.А. Еманова являются процессы формирования **природной и наведенной сейсмичности** в структуре Земной коры Алтае-Саянской горной области и прилегающих территорий.

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

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью перехода от традиционного мониторинга сейсмичности к комплексному анализу ее 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 (на фотобумаге) 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:

- развертывание плотных временных сейсмических сетей в очаговых зонах крупных землетрясений;
- мониторинг областей тектонической активизации и зон интенсивного техногенного воздействия;
- исследования в районах строительства критически 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;
- повышение точности определения глубин очагов землетрясений.

- Кроме того, актуально сопоставление современной сейсмичности с линеamentными 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 (техногенной) сейсмичности** в ранее асейсмичных районах. Особую важность приобрели исследования техногенного влияния с высокой детальностью и точностью. Так, **Бачатское землетрясение 2013 г. ($M=6.1$)** 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.

Методы исследования, фактический материал: 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, функционировавшими с 14 августа 2014 года по 11 июня 2016 года.

Сбор и обработка данных сформированы с 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] использовался для расчета и отображения фокальных механизмов. Восстановление поля тектонических напряжений земной коры осуществлялось методом катакластического анализа [Ребецкий, 1999, 2007]. Нейронная сеть детектора EqTransformer применялась 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>).

Высокая степень достоверности полученных результатов обеспечивается:

Использованием физико-математически обоснованных методов обработки данных с расчётом дисперсии ошибки, признанных в мировой науке высокоточными.

Большим объёмом обработанных данных (десятки тысяч землетрясений) с проверкой сходимости результатов во времени и пространстве.

Сходимостью результатов при повторных исследованиях одной и той же очаговой зоны с разными выборками по размещению станций.

Высоким качеством экспериментальных данных, подтвержденных непрерывным контролем из центра сбора и обработки.

Использованием избыточных для решения задачи систем наблюдения и априорной информации о скоростном строении земной коры, полученной другими авторами и другими методами.

Личный вклад

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

Еманов А.А. в более чем 20-летний период активный участник и руководитель экспериментальных работ с временными сетями станций на Алтайском сейсмологическом полигоне, при изучении очаговой зоны Чуйского землетрясения 2003 года, Айгулакской очаговой зоны. Руководитель и участник экспериментальных работ в очаговых зонах Урэг-Нурского землетрясения 1970 г., Тувинских землетрясений 2011-2012 гг., 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 вплоть до 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.

Научная новизна результатов исследования.

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 многоуровневых по детальности и задачам экспериментов.

2. На основе исследования координат гипоцентров событий с точностью 300-500 м по горизонтали и с точностью 2 км по глубине построена объемная модель сейсмически активизированных разломов 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 модель афтершокового процесса двух Тувинских землетрясений 2011 и 2012 годов, создана геомеханическая модель, единой очаговой области для этих землетрясений.

5. Определена 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, 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. Получены координаты гипоцентров более 5.5 тысяч землетрясений в этом районе.

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 их изменения во времени и пространстве в районе подземной добычи угля. Установлен эффект триггерного влияния вибрации от работающих комбайнов на наведённую сейсмичность.

Практическое значение.

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 являют 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. Способствуют развитию представлений о разломной структуре земной коры.

Результаты изучения характеристик техногенной сейсмичности в местах добычи твердых полезных ископаемых дают возможность оценить реальную их опасность.

Защищаемые положения, отражающие главные результаты диссертационной работы:

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 сеймотектонических 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, 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.

Всё вышеуказанное дает основание утверждать, что **диссертационная работа А.А. Еманова** соответствует **паспорту научной специальности 1.6.9 «Геофизика» по физико-математическим наукам**, поскольку получены научные результаты, которые соответствуют направлению исследований: п. 6 и п. 10. Материалы диссертации изложены **в трех монографиях, в 78 статьях в журналах из Перечня ВАК**, из них 57 статей по теме диссертации и по специальности 1.6.9 – «Геофизика». Статей в Белом списке: уровень 1 - 11 статей, уровень 2 – 44 статьи. Получено два свидетельства о государственной регистрации базы данных и одно на программу для ЭВМ.

Результаты исследования представлены за период с 2002 по 2025 гг. из них публикаций по категориям ВАК: К1 - 20 статей, К2 - 12 статей и К3 – 2 статьи.

Текст диссертации был проверен в системе «Антиплагиат. Эксперт»: оригинальность с учетом самоцитирования – 97.107 %.

Комиссия считает диссертацию завершённым научно-квалификационным трудом, содержащим существенные новые результаты, имеющие важное научное и практическое значение, и рекомендует:

1. Принять к защите диссертацию А.А. Еманова.

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

3. В качестве официальных оппонентов рекомендуются:

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.

Комиссия диссертационного совета:

Председатель комиссии,
д.ф.-м.н.



В.А. Чеверда

д.г.-м.н.



В.С. Селезнев

д.ф.-м.н.



М.И. Протасов

д.т.н.

Ю.И. Колесников