

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 минимально возможными погрешностями** для уточнения и **повышения достоверности оценки сейсмической опасности.**

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью перехода от традиционного мониторинга сейсмичности к комплексному анализу её природных и техногенных факторов. Это связано с возрастающими требованиями к точности прогноза и достоверности в оценке рисков при росте антропогенного и техногенного воздействий на земные недра.

Изучение коровой сейсмичности Алтае-Саянской складчатой области активно развивалось во второй половине XX века благодаря развёртыванию региональной сети сейсмических станций с аналоговой регистрацией (на фотобумаге) данных и их «ручной» обработкой. На рубеже XX–XXI веков переход на цифровые станции открыл новые возможности, но повысил требования к разработке более совершенных систем сбора данных и созданию современных центров обработки информации.

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

- развёртывание временных плотных сейсмических сетей в очаговых зонах крупных землетрясений;
- мониторинг сейсмического режима в областях тектонической активизации и зонах интенсивных техногенных воздействий;
- исследования в районах строительства критически важных объектов инженерной инфраструктуры.

Особое значение приобрело изучение динамических изменений сейсмичности в наиболее активных очаговых зонах землетрясений, включая:

- реконструкцию структуры активизированных разломов;
- анализ пространственно-временных изменений сейсмической активности;
- повышение точности определения глубин очагов землетрясений.

Кроме того, актуальным стало сопоставление областей современной сейсмичности с линеаментными зонами для уточнения ее исходных значений 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 событий во второй половине XX века (**Урэг-Нурское 1970 г.**, **Бусингольское 1991 г.** и др.).

Наблюдения в активизированных разломных системах этих областей позволили по-новому интерпретировать связи тектонических процессов с сейсмичностью.

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

В XXI веке рост масштабов добычи полезных ископаемых привёл к возникновению **наведенной (техногенной) сейсмичности** в ранее асейсмичных районах. Особую важность приобрели высоко детальные и более точные исследования техногенного влияния. Так, **Бачатское землетрясение 2013 г. ($M=6.1$)** продемонстрировало разрушительный потенциал таких техногенных воздействий.

Отдельный аспект этой проблемы представляет **платформенная сейсмичность юга Западной Сибири**, слабо изученная ранее, но представляющая угрозу из-за высокой плотности населения и развивающейся инфраструктуры на ее территории.

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

Методы исследования, фактический материал: Основой решения поставленной в диссертации проблемы 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; оценки и временного мониторинга соотношений сигнал/шум. Важнейшим моментом является объединение для комплексного анализа сейсмологических данных и информации о рельефе местности, тектонических процессах, геологического строения и иных материалов.

Основным массивом экспериментальных данных для исследований являлись зарегистрированные на ряде станций трёхкомпонентные измерения, передаваемые в реальном масштабе времени в центр обработки. Разработка и создание системы станций выполнялось под руководством и при непосредственном участии соискателя. Полевые эксперименты с плотными сетями станций в зонах сейсмических природных и техногенных активизаций

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.

Важная роль соискателя в изучении сейсмотектонического процесса заключается в экспериментальных исследованиях высокой детальности и точности на Алтайском сейсмологическом полигоне с 2002 года по настоящее время.

При изучении Хубсугульского землетрясения 2021 года исследования проводились на сети станций Алтае-Саянского и Байкальского филиалов ФИЦ ЕГС РАН совместно с данными сети станций Монголии. 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 системой сбора и хранения информации, программами контроля качества поступающих данных, программами разных уровней обработки информации. Для получения новых результатов в работе использовались программы: для региональных данных в рамках глобальной скоростной модели IASPEI91 – LocSat; для локации событий в рамках многослойной скоростной модели – HYPOINVERSE-2000 [Klein, 2002] и hypo71 [Lee, Lahr, Valdes]; для уточнения положения гипоцентров землетрясений (метод двойных разностей) – HypoDD [Waldhauser and Ellsworth, 2000]; для сейсмической томографии с двойными разностями – TomoDD [Zhang, Thurber]; для расчета и отображения фокальных механизмов – FPFIT [Reasenberg and Oppenheimer, 1985]. Восстановление поля тектонических напряжений земной коры осуществлялось методом катакластического анализа [Ребецкий, 1999, 2007]. Нейронная сеть детектора EqTransformer применялась для определения фаз P- и S-сигналов от землетрясений [Mousavi, 2020].

В процессе работы использовались 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, признанных в мировой науке высокоточными, в соответствии с вычисленными значениями дисперсии;

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 наблюдаемых экспериментальных данных, подтверждённых непрерывным контролем из центра сбора и обработки;

использованием избыточных систем наблюдения для решения задач и наличием априорной информации о скоростной модели земной коры, полученной другими исследователями и независимыми методами.

Личный вклад

Автором внесён основной вклад в формирование центра сбора и обработки сейсмологических данных Алтае-Саянского региона. Сформированы базы данных, охватывающие первичные измерения и результаты различных этапов обработки, а также материалы других региональных геофизических исследований, используемых как априорная информация в процессе обработки сейсмологической информации и необходимой для интерпретации. Соискатель является автором программ обработки данных и контроля качества работы аппаратуры в экспериментах, а также непрерывного контроля шумов на сети станций.

А.А. Еманов на протяжении более двух десятилетий является активным участником и руководителем экспериментальных работ с временными сетями станций на Алтайском сейсмологическом полигоне при изучении очаговой зоны Чуйского землетрясения 2003 года, Айгулакской очаговой зоны. Он – руководитель и участник полевых работ в очаговых зонах Урэг-Нурского землетрясения (1970 г.), Тувинских землетрясений (2011-2012 гг.), а также при исследовании техногенной сейсмичности Кузбасса и Горловского угольного бассейна (Новосибирская область) 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 применения процедур искусственного интеллекта.

А.А. Еманов является соавтором создания иерархической структуры напряжённого состояния природных и техногенных очаговых зон, теоретически обоснованных в работах Д.Н. Осокиной. Он 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 для исследований с использованием современных методов и программ в сейсмологии и геофизике, дополненных работой соискателя и объединенных в единую надежную систему. В едином комплексе программ объединены возможности обработки многоуровневых по детальности данных и решения экспериментальных задач.

2. На основе вычисленных координат гипоцентров событий с погрешностью 300–500 м по горизонтали и 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. Установлена сейсмическая активизация смежных структур и выделены активизированные структуры в зоне их дальнего влияния на развитие сейсмичности.

4. Построена объёмная модель афтершокового процесса двух Тувинских землетрясений 2011 и 2012 гг., создана геомеханическая модель единой очаговой области для этих землетрясений.

5. Определена пространственно-временная структура 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 для 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 землетрясения. 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 прогнозировать дальнейшее изменение состояния среды при продолжающейся добыче угля в карьере.

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 властным структурам, подразделениям МЧС, предприятиям для решения вопросов безопасности, а также средствам массовой информации. Созданные базы данных являются основой работы по уточнению исходной сейсмичности и построения карт детального сейсмического районирования. Данные о физических процессах и условиях в очагах крупных землетрясений Алтае-Саянской области важны для разработки методов прогноза землетрясений. Пространственно-временные связи в процессах сейсмичности и данные об их эволюции составляют основу планирования экспериментов по уточнению мест зарождения сейсмических активизаций. Данные о сейсмически

активизированных разломах в очаговых областях вносят вклад в понимание тектонического строения, способствуя развитию представлений о разломной структуре земной коры.

Результаты изучения характеристик техногенной сейсмичности в местах добычи твёрдых полезных ископаемых дают возможность оценить реальную ее опасность для окружающих территорий.

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 в публикациях по категориям ВАК: К1 - 20 статей, К2 – 12 статей и К3 – 2 статьи.

Текст диссертации был проверен в системе «Антиплагиат. Эксперт»: оригинальность с учётом 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, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор РАН, заместитель директора, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук;

Буслов Михаил Михайлович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук;

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.



Г.В. Решетова

д.ф.-м.н.



М.И. Протасов

д.г.-м.н.



В.С. Селезнев

д.т.н.



Ю.И. Колесников