

УДК 550.34

Сейсмологические исследования на территории Алтае–Саянской горной области

© 2021 г. А.Ф. Еманов¹, А.А. Еманов^{1,2}, А.В. Фатеев^{1,2}, В.М. Соловьев¹,
Е.В. Шевкунова¹, Е.А. Гладышев¹, И.А. Антонов¹, Д.Г. Корабельщиков¹,
В.Г. Подкорытова¹, В.В. Янкайтис¹, С.А. Елагин¹, Н.А. Сержников¹,
А.В. Дураченко¹, А.И. Артемова¹

¹АСФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия; ²ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 17.02.2021 г.

Аннотация. Выполнен краткий обзор сейсмологических исследований в Алтае–Саянской горной области. Описано развитие сети сейсмологических станций и экспериментов с временными станциями в эпицентральных зонах крупных землетрясений. Показано, что фоновая сейсмичность региона упорядочивается со временем в структуры с иерархией по скорости проявления. Крупные землетрясения в ряде случаев происходят в местах, не обязательно совпадающих с районами повышенной фоновой сейсмичности. Крупные землетрясения Восточной Тувы (Бусингольское, Белин-Бий-Хемское и др.) происходят как сдвиги с вращениями блоков около рифтовых впадин. Крупные землетрясения Западного Саяна и хребта Академика Обручева (Тувинское-I и Тувинское-II, Саянское) приурочены к поперечным к этим структурам разломам и являются результатом неравномерного выдвигания блоков Тувинской котловины и Тувинского нагорья к северу. Исследованиями в Горном Алтае установлено, что после длительного периода (около 10 лет) доминирования в сейсмичности афтершокового процесса Чуйского землетрясения наступил период сейсмической активизации смежных (60–80 км) и удалённых в радиусе (примерно 260–280 км) структур. Центр сейсмической активности сместился от эпицентра Чуйского землетрясения 2003 г. к эпицентру Айгулакского землетрясения 2019 г. Экспериментальными работами с мощными вибраторами определены возможности сети сейсмологических станций в вибросейсмическом мониторинге земной коры.

Ключевые слова: сейсмология, землетрясения, сейсмические сети, Алтае–Саянская горная область.

Для цитирования: 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., Сержников 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. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.2.02>

Введение

Алтае–Саянская горная область представляет собой систему разно ориентированных горных хребтов и впадин с ячеистой структурой (рис. 1). Горный Алтай, входя из Монголии на территорию России в виде узкой системы Монгольского Алтая, веером расходится в северном направлении, образуя широкую горную страну, состоящую из хребтов с простираем от северо-западного до северо-восточного. Системы впадин, разделяющие горные хребты, являются важным элементом тектонического развития Горного Алтая. Почти с восточного направления подходит к Горному Алтаю система хребтов Западного

Саяна. Южнее к Горному Алтаю с востока подходят хребты Танну-Ола и ещё южнее (уже в Монголии) хребет Хан-Хухэй.

Разделение горных хребтов осуществляют Тувинская котловина и впадина Убсу-Нуур. Восточная часть горной системы образована Тувинским нагорьем, ограниченным с юга хребтом Сенгилен и с севера хребтом Академика Обручева. Тоджинская впадина ограничена с трёх сторон хребтами Западный Саян, Восточный Саян и хр. Академика Обручева. С востока от Тувинского нагорья в три ряда расположены рифтовые впадины: Белинская, Бусингольская и Терехольская, выстроенные почти в линию. Являясь окончанием Байкальской рифтовой зоны

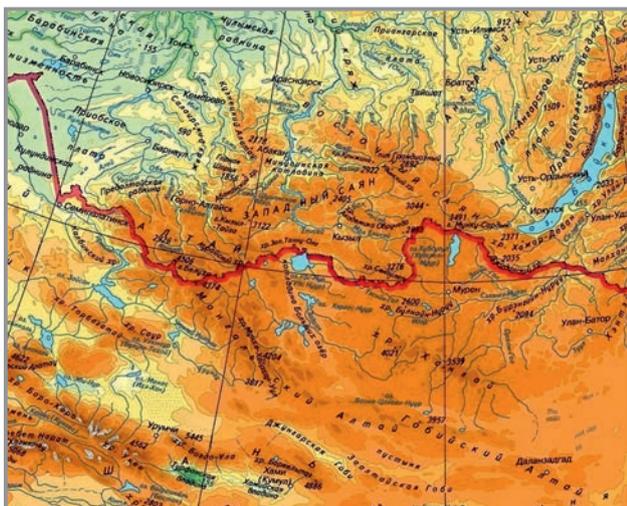


Рис. 1. Географическая карта Алтае-Саянской горной области

и восточным ограничением Алтае-Саянской горной области, они расположены перпендикулярно к простиранию остальных впадин. Параллельно впадинам вытянулся хребт Шишхидский, а за ним – Дархатская рифтовая впадина. К северу от хр. Западный Саян между хр. Восточный Саян и Кузнецким Алатау расположена Минусинская котловина. Между Кузнецким Алатау и Салаирским кряжем вытянулась

Кузнецкая впадина. С севера эта система ограничена Томь-Колыванской складчатой зоной. С запада от Салаирского кряжа и к востоку от Томь-Колыванской зоны расположена узкая и глубокая Горловская впадина. Хребты Горного Алтая также разделены впадинами: Чуйская, Курайская, Уймонская, оз. Телецкое и др. Это главные структурные элементы Алтае-Саянской горной области; более полную информацию о морфоструктуре и морфотектонике региона можно получить из работ [Зятькова, 1977; Новиков, 2004]. Кроме того, упоминания о структурных элементах региона последуют в процессе изложения материала в данной работе.

Структура Алтае-Саянской горной области определяет закономерности развития сейсмичности в этом регионе. Исследование региональной сейсмичности в данном регионе началось с 1960-х гг., когда начала формироваться сеть станций в СССР, в том числе и в Алтае-Саянском регионе.

Развитие сети сейсмологических станций

На рис. 2 показана карта сети сейсмологических станций Алтае-Саянской области с указанием года открытия. Всего к 2000 г. на территории региона было 15 сейсмических станций,

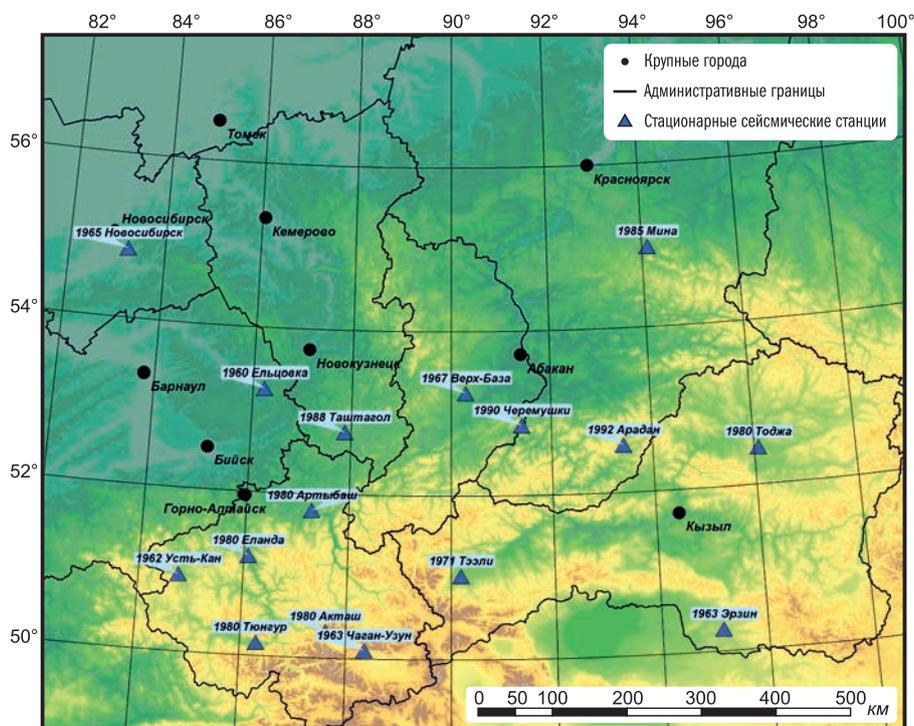


Рис. 2. Сеть сейсмических станций Алтае-Саянской области в XX в.

Цифрами указан год открытия

даты открытия которых варьируют от 1962 до 1990 года. Создание такой сети станций стало крупным шагом к изучению сейсмичности региона [Жалковский, Моисеенко, 1966; Жалковский, 1967; Масарский, Рейснер, 1971; Жалковский и др., 1995; Дергачев, Данциг, 1989].

Основной задачей первого периода было изучение основных сейсмоактивных структур Алтае-Саянской горной области для сейсмического районирования. Недостаточность сети станций для решения многих задач сейсмологии даже в этот период восполнялась исследованиями с временными сетями станций [Гайский, Жалковский, 1971а; Дергачев, Филина, 1990]. Как правило, это были три-четыре станции, выставленные в сейсмически активной в этот момент локальной структуре: хр. Шапшальский в Западной Туве [Гайский, Жалковский, 1972] и район Таштагольского землетрясения 1988 г. в Горной Шории [Дергачев, Филина, 1990]. Даже в таком варианте были уточнены данные о глубинах землетрясений и о микросейсмичности некоторых районов Алтая.

Развитие сейсмологической сети Алтае-Саянской горной области совпало с переходом с аналоговой регистрации на фотоплёнку на цифровую регистрацию. Выбор пал на разработанную к этому времени аппаратуру «Байкал» [Семибала-

мут, Рыбушкин, 2003], имеющую также вариант, изготовленный для инженерно-сейсмометрического мониторинга зданий и объектов [Павленов и др., 2000].

Переход с аналоговой регистрации на цифровую был выполнен в 2000–2001 гг. во всех сибирских подразделениях Геофизической службы СО РАН по единой программе и при финансовой помощи в изготовлении аппаратуры головной организацией.

Развитие сети станций осуществляется рывками, наиболее интенсивными из которых являются периоды создания сетей Горного Алтая и Кузбасса. На рис. 3 представлена сейсмологическая сеть на 2020 год.

Алтайский сейсмологический полигон был создан в 2002 г. и охватил высокогорные районы Республики Алтай. Сеть станций создавалась для детального изучения природной сейсмичности и её закономерностей в условиях стеснённого сжатия блочной структуры.

Вторым районом значительного развития сети станций явился Кузбасс, где важной проблемой стало исследование наведённой сейсмичности около угольных шахт и разрезов. Развитие сети станций в этом районе проведено при финансовой поддержке Администрации Кемеровской области и угольных предприятий.

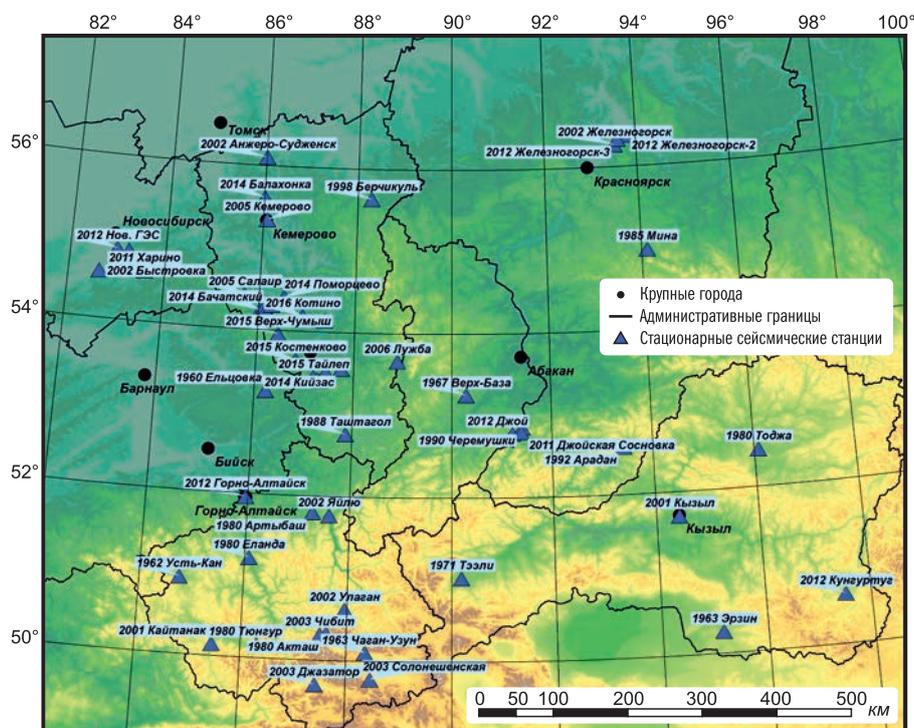


Рис. 3. Сеть сейсмических станций Алтае-Саянской области в 2020 г.

Цифрами указан год открытия

Незначительное увеличение станций осуществлено в районе г. Новосибирска при финансовой поддержке ГЭС и в районе г. Железногорска (Красноярский край) на средства Горнохимического комбината. Ещё одна станция для изучения природной сейсмичности была установлена в пос. Кунгуртук (Терехольская впадина, Восточная Тува) при финансовой поддержке головной организации ФИЦ ЕГС РАН.

Возможности сети станций демонстрирует рис. 4. Для района ответственности АСФ ФИЦ ЕГС РАН полностью представительной является регистрация землетрясений с $ML=3$, при этом для большей части территории представительна регистрация землетрясений с $ML=2$. Для наиболее сейсмоактивной территории Алтае-Саянской горной области представительны регистрируются землетрясения с $ML=1.5$. Лишь на отдельных фрагментарных территориях региона ведётся представительная регистрация землетрясений с $ML=1$: Алтайский сейсмологический полигон, Кузбасс, а также ближайшие территории около городов Новосибирск и Железногорск. Неравномерность распределения станций по площади приводит к разной представительности и точности изучения сейсмичности разных геологических структур. В первую очередь, недостаточны возможности сейс-

мологических исследований Белино-Бусингольской зоны, где проходит граница между коллизионными структурами Алтае-Саянской области и впадинами Байкальской рифтовой зоны, характеризующейся высокой сейсмичностью [Цибульчик и др., 1964; Жалковский, 1967; Хилько и др., 1985; Жалковский и др., 1995; Молнар и др., 1995; Еманов А.Ф. и др., 2003а; 2005].

Наблюдается недостаточное количество станций в Республике Тува в целом, при том, что район является одним из самых сейсмоактивных в Алтае-Саянской горной области. В Монголии вдоль границы с Россией (в Туве) протягивается Болнайский разлом, известный землетрясениями с магнитудой 8 [Хилько и др., 1985]. Не обеспечены достаточной сетью станций районы горных систем Западного и Восточного Саяна. В центральной части Алтае-Саянской области пониженная представительность регистрации землетрясений на территории Республики Хакасия. На западе территории Алтайского края есть лишь одна сейсмологическая станция на Салаирском кряже (самый восток Алтайского края), а сейсмичность остальной территории плохо контролируется региональной сетью станций. Нет сейсмологических станций в западных районах Новосибирской области, хотя землетрясения с магнитудой около 4 иногда регистрируются

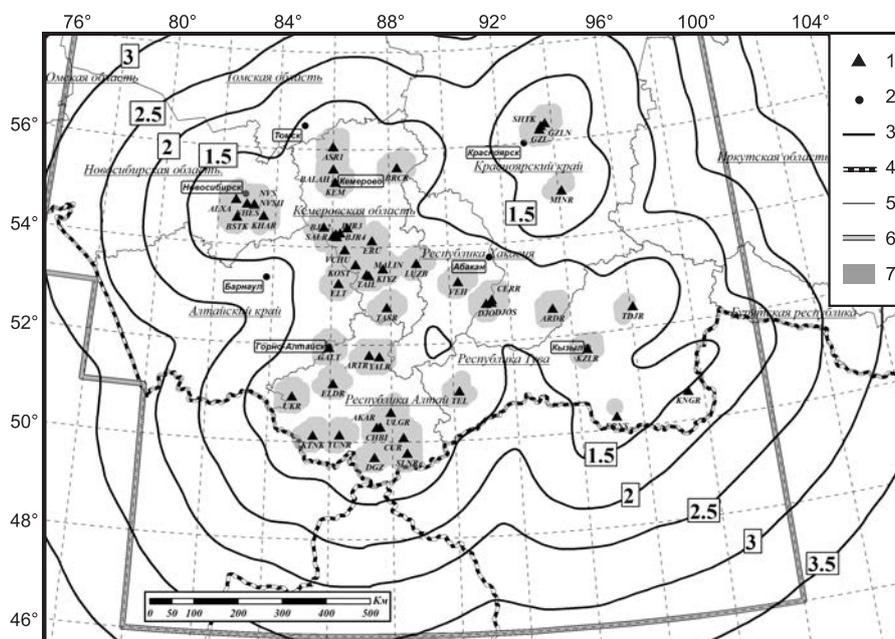


Рис. 4. Карта изолиний энергетической представительности ML_{min} регистрации землетрясений Алтае-Саянской региональной сетью станций.

- 1 – стационарная сейсмическая станция; 2 – крупные города (столицы административных субъектов РФ);
- 3 – изолиния ML_{min} ; 4 – государственная граница; 5 – границы административных субъектов; 6 – зона ответственности АСФ ФИЦ ЕГС РАН; 7 – участки с энергетической представительностью $ML_{min}=1$

и нужно понимать, что события малых энергий в этом районе могут быть пропущены. Северные районы зоны ответственности АСФ ФИЦ ЕГС РАН (Томская область и центральные и северные районы Красноярского края) также не имеют станций. Наиболее крупные землетрясения в северных районах регистрируются региональной сетью станций, но возможность наблюдения за слабой сейсмичностью практически отсутствует.

Учитывая недостаточность сети сейсмологических станций Алтае-Саянской горной области [Дергачев, Данциг, 1989], для решения научных и практических задач с 2002 г. ежегодно проводятся наблюдения с временными сетями цифровых сейсмологических станций. Первые такие эксперименты проводились в 2002 г. в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения 2003 г. с $M_s=7.3$ [Еманов А.Ф. и др., 2003а] и в 2003 г., до и в период главного толчка Чуйского землетрясения [Еманов А.Ф. и др., 2003б; Еманов А.Ф. и др., 2009а]. Благодаря высокой точности эпицентральных работ в период подготовки Чуйского землетрясения и начала афтершокового процесса были получены высокоточные данные о структуре афтершокового процесса и её изменении во времени и пространстве [Гольдин, Кучай, 2007; Еманов А.А., Лескова, 2005]. В Чуйско-Курайской зоне ежегодно выставляется временная сеть цифровых станций [Еманов А.Ф. и др., 2007а; Еманов А.А. и др., 2010]. Количество комплексов и места их установки ориентированы на конкретные задачи с учётом меняющейся структуры сейсмичности в этой зоне. Эксперименты с временными сетями станций проводились и в других частях Алтае-Саянской горной области.

Временные сети станций сыграли существенную роль в изучении природы наведённой сейсмичности в Кузбассе. Впервые эксперименты были проведены в районе шахт около г. Осинники [Еманов А.Ф. и др., 2007б]. Очень важные результаты были получены при исследованиях в районе шахт около г. Польшаево [Еманов А.Ф. и др., 2009б], где на локальном участке 10×10 км устанавливалось до 36 сейсмологических станций. Столь плотная сеть станций устанавливалась в связи со сложностью решения задач по природе возникновения и протекания наведённой сейсмичности около шахт. Среди других локальных сетей по изучению наведённой сейсмичности наиболее представителен эксперимент в районе разреза «Бачатский», в районе которого проведены исследования Бачатского землетрясения с $ML=6.1$ [Еманов А.Ф. и др., 2020].

Эксперименты с локальными сетями станций выполнялись в районе г. Камень-на-Оби [Еманов А.Ф. и др., 2012б], когда ставилась задача изучить на уровне микроземлетрясений вопрос о тектонической активности эпицентральной зоны [Жалковский и др., 1965], активной в шестидесятые годы XX в. и асейсмичной в начале XXI в. (вывод был сделан при отсутствии сейсмологических станций вблизи этой зоны). Локальная сеть станций выставлялась в районе стыков Томь-Колыванской складчатой зоны с Салаирским кряжем и с Кузнецким Алатау. Эксперименты выполнялись с целью оценки сейсмической активности стыков структур.

Временная сеть станций устанавливалась в горах Западного Саяна при изучении афтершоков Саянского землетрясения 10.02.2011 г. с $ML=6.1$, а также на хребте Академика Обручева при изучении афтершоков Тувинского-I 27.12.2011 г. с $ML=6.7$ и Тувинского-II 26.02.2012 г. с $ML=6.8$ землетрясений на Каахемском разломе, сформировавших единую афтершоковую область.

В соответствии со сводами правил при сейсмологических исследованиях на особо ответственных объектах, временные сети станций применялись в районах строительства таких объектов около городов Томск, Красноярск, Кызыл и др.

На сегодняшний день равномерность сети стационарных станций нарушена двумя элементами этой сети с увеличенной плотностью станций – это Алтайский сейсмологический полигон и система мониторинга наведённой сейсмичности в Кузбассе.

Результаты сейсмологических исследований

Начиная с 1960 г., постоянно изучаются сейсмоактивные структуры региона, и данные о них продолжают уточняться. Поскольку крупные землетрясения происходят редко и за период инструментальных наблюдений не все наиболее сейсмически опасные структуры проявили себя, то и исследования на уровне умеренной и слабой сейсмичности представляют практический и научный интерес. Сейсмологические работы в Алтае-Саянской области выполнялись по мере наполнения каталога землетрясений. Задачи выполняющихся исследований можно разделить на следующие:

- сейсмическое районирование, в том числе структуры сейсмоактивных зон;
- изучение параметров сейсмического режима Алтае-Саянской горной области;

- исследование точности и представительности регистрации землетрясений;
- изучение затухания сейсмических волн;
- исследования глубин землетрясений;
- закономерности возникновения крупных землетрясений;
- природа землетрясений в разных структурах;
- напряжённое состояние земной коры по механизмам очагов землетрясений;
- влияние крупных землетрясений на сейсмический режим Алтае-Саянской области;
- исследование моделей скоростного строения земной коры;
- изучение структуры сейсмически активизированных разломных зон;
- эволюция сейсмичности в Алтае-Саянской области и её связь с тектоникой.

Структура сейсмичности Алтае-Саянской горной области

Структура сейсмичности Алтае-Саянской области впервые представлена в работе [Цибульчик и др., 1964] и многократно уточнялась по мере накопления информации о землетрясениях [Жалковский, Моисеенко, 1966; Жалковский, 1967; Жалковский, 1989в; Жалковский и др., 1995; Еманов А.Ф. и др., 2003а, 2005; Дергачев, 2008].

В работах [Еманов и др., 2003б; 2005] сформирован иной взгляд на развитие сейсмичности

в регионе. Если на рис. 5 прежде всего доминируют в сейсмической активности области, где происходили крупные землетрясения и землетрясения, то в отмеченных работах сейсмичность разделяется во времени и анализируется совместно с картой рельефа региона. Составлена система годовых карт всего периода наблюдений, один из примеров представлен на рис. 6, и пятилетних карт. Сравнение таких карт позволило выявить следующее:

- определяющее влияние на протекание сейсмического процесса оказывает блоковая структура Алтае-Саянской горной области. Сочетание приподнятых горных массивов с впадинами создаёт ячеистую структуру, которая оказывает упорядоченное сопротивление коллизионному воздействию со стороны Джунгарской впадины, являющейся элементом повышенной прочности, разделяющим Алтай и Тянь-Шань;
- в сейсмическом режиме региона следует выделить фоновую сейсмичность и сейсмические активизации, как правило, связанные с крупными землетрясениями;
- сейсмические активизации можно рассматривать как нестационарный режим той или иной геологической структуры. Мощные сейсмические активизации структур Алтае-Саянской области формировались вокруг крупнейших землетрясений, прежде всего, как афтершоковый процесс.

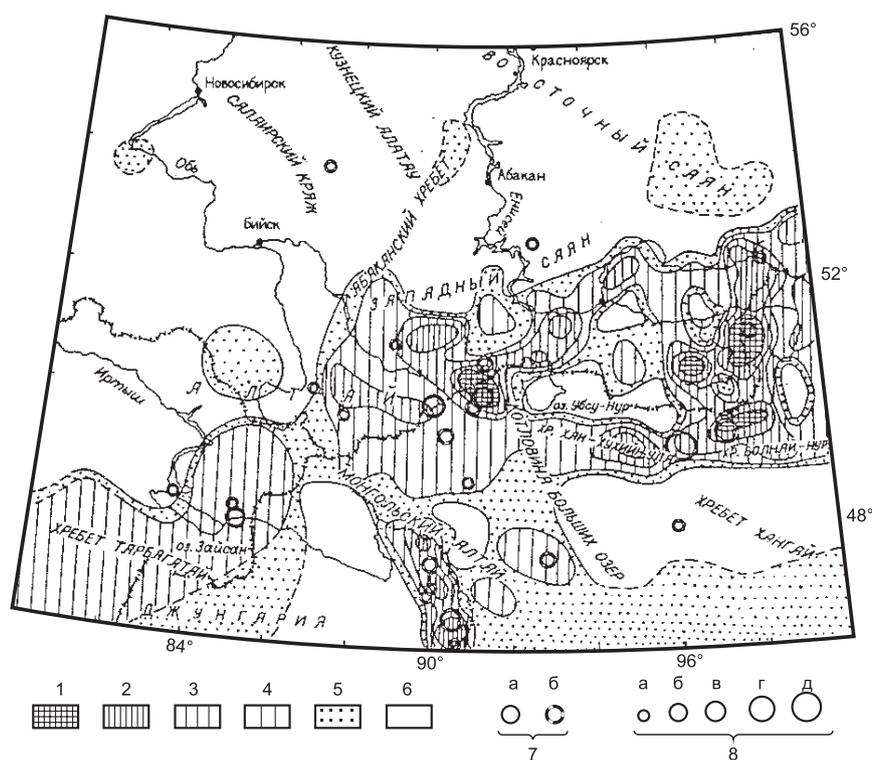


Рис. 5. Карта сейсмической активности A_{10} и эпицентров сильных ($M \geq 6$) землетрясений Алтае-Саянской области [Жалковский и др., 1995] по площадкам осреднения $40 \times 40 \text{ км}^2$.

- 1 – $A_{10} \geq 0.2$;
- 2 – $0.2 > A_{10} \geq 0.1$;
- 3 – $0.1 > A_{10} \geq 0.05$;
- 4 – $0.05 > A_{10} \geq 0.02$;
- 5 – $0.02 > A_{10} \geq 0.01$;
- 6 – $A_{10} < 0.01$;
- 7: а – эпицентры землетрясений по инструментальным и макросейсмическим данным за период до 1963 г.; б – по инструментальным и макросейсмическим данным за 1963–1991 гг.; 8 – магнитуда землетрясений: а – $6.0 \leq M < 6.5$; б – $6.5 \leq M < 7.0$; в – $7.0 \leq M < 7.5$; г – $7.5 \leq M < 8.0$; д – $M \geq 8.0$

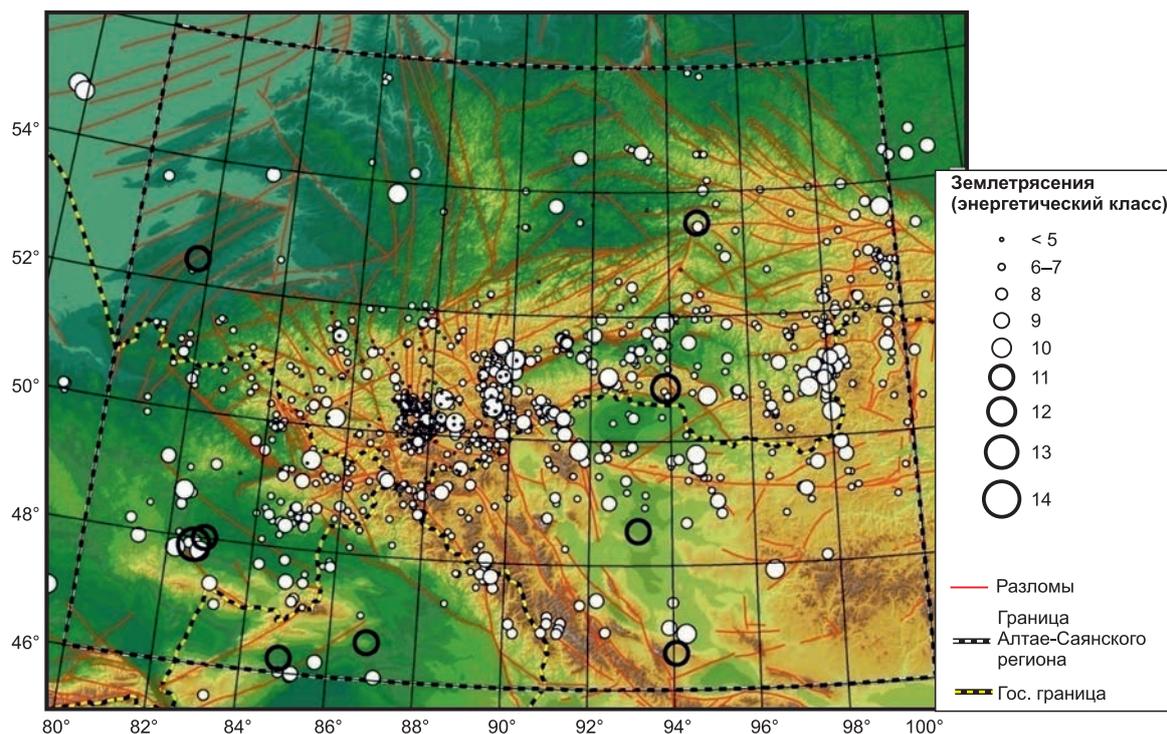


Рис. 6. Карта эпицентров землетрясений Алтай-Саянской горной области за 2002 г.

О повторяемости землетрясений в Алтай-Саянской горной области

Исследование наклона графика повторяемости выполнялось, начиная с первых лет развития сейсмологических наблюдений в регионе [Гайский, Жалковский, 1971б; Жалковский, Мучная, 1987; Жалковский, 1988; 1989а; 1989б], и при этом прежде всего исследовался вопрос о смещённости и точности оценки наклона графика повторяемости. Такая тема была актуальной в связи с малым количеством станций в регионе и небольшим количеством землетрясений в каталогах. Исследования показали, что результаты хорошей точности удаётся получить при количестве землетрясений в каталоге от тысячи и более; тогда результат оценки наклона графика повторяемости не зависит от метода его расчёта [Жалковский, Мучная, 1987]. На сегодняшний день пополнение каталога землетрясений за год составляет от пяти до нескольких десятков тысяч событий в зависимости от сейсмической активности региона. Актуальными стали вопросы: меняется ли во времени наклон графика повторяемости? Меняется ли его наклон в пространстве Алтай-Саянской горной области? По афтершокам крупных землетрясений наклон графика повторяемости совпадает с наклоном для всего региона или нет?

Решение вопроса о существовании изменений в наклоне графика повторяемости оригинальным образом решалось в работе [Еманов А.А. и др., 2001]. Рассматривая события всего двух энергетических классов, можно записать закон повторяемости землетрясений в виде:

$$\Delta \lg N / \Delta K = -\gamma. \quad (1)$$

Чем большее число событий мы возьмём, тем, как известно из сходимости γ , лучше будет выполняться это соотношение в случае, если γ — неизменная величина. Следовательно, для двух случайных процессов $N(K_i)$ и $N(K_j)$ выделения сейсмической энергии существует зависимость, выражающаяся в выполнении равенства:

$$M \left[\frac{\lg N(K_i) - \lg N(K_j)}{K_i - K_j} \right] = -\gamma, \quad (2)$$

где M — математическое ожидание, или:

$$M \left[\frac{\Delta \lg N}{\Delta K} \right] = -\gamma. \quad (3)$$

Если связь между двумя случайными процессами (в данном случае между числом событий разных энергетических классов) описывается значением математического ожидания, то это не полная характеристика связи. В математическом

ожидании нет зависимости от времени. Рассматривая закон повторяемости как математическое ожидание некоторой связи, мы уже лишаем себя возможности анализировать связь двух процессов во времени.

Отвлечёмся на анализ данных по Алтае-Саянскому региону и после этого рассмотрим, как можно ввести пространственно-временные связи в описание сейсмического процесса на основе закона повторяемости землетрясений.

По каталогу землетрясений Алтае-Саянского региона построен график вариаций γ за весь период инструментальных наблюдений (рис. 7). Значение γ рассчитывалось методом наименьших квадратов в скользящем временном окне шириной 365 дней со сдвигом на один день. Использование шкалы в днях применялось в связи с тем, что время в месяцах или годах не является линейным. Для цифровой обработки на самом деле время в каталоге было приведено в секунды, но для отображения на рисунках использована шкала в днях как более удобная для обозрения результатов. Определение наклона графика за год для каталога Алтае-Саянской горной области показывает существенные изменения его значения.

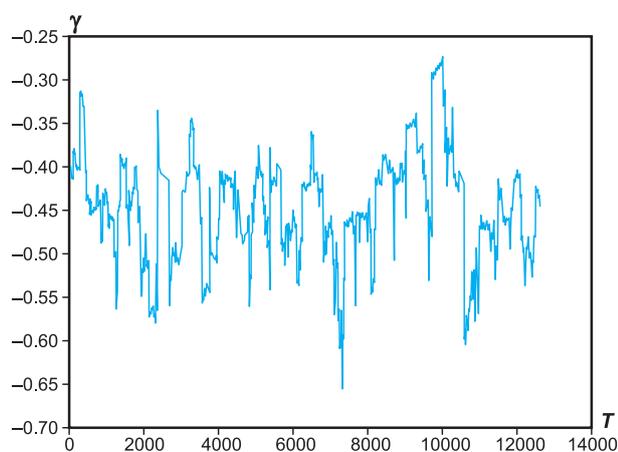


Рис. 7. График изменения γ во времени от 1963 г. (T – период построения γ в днях)

Для того чтобы понять, какой период времени можно считать достаточным для построения γ , был построен несколько иной график [Еманов А.А. и др., 2001]. Для этого зафиксировали некоторое t_0 – начальное время – и построили ряд γ для увеличивающегося временного промежутка (t_0, t). Время увеличивается последовательно с шагом в один день. Этот график должен отражать особенности сходимости ряда $\gamma(t)$ к некоторому значению. В начале графика хорошо видно, как при недостаточной выборке отдельные достаточно крупные события выво-

дят график из равновесия, а затем афтершоковые последовательности постепенно возвращают график к более равновесному положению. В районе 4000 дней с начала наблюдений график γ становится мало зависящим от отдельных событий. Примерно начиная с 9000 и до 10000 дней наблюдается ярко выраженная аномалия в значениях γ . Интересно, что эта аномалия предшествует очень большой активизации с главным толчком с $K_p=17$.

На рис. 8 явно видно, что наклон графика повторяемости, определяемый по событиям с $K_p=10$ и $K_p=11$, претерпевает изменения во времени. Изменения возникают и как аномальные участки, и как медленные изменения во времени. На рисунке видно, что γ стремится к некоторому значению с увеличением временного периода построения. Можно рассмотреть график повторяемости как процесс, сходящийся к некоторой зависимости.

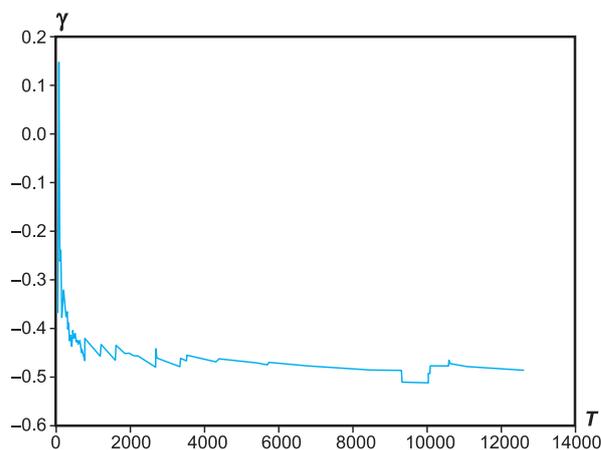


Рис. 8. Сходимость γ для Алтае-Саянского региона (T – период построения γ в днях)

При выполнении работы по детальному сейсмическому районированию в Кузбассе были выделены уточнённые положения зон ВОЗ и для каждой проведены определения наклона графика повторяемости [Геомеханические поля ..., 2018]. Различия в наклоне графиков повторяемости для разных зон ВОЗ уверенно доказываются.

На рис. 9 на графике повторяемости объединены все имеющиеся данные (инструментальные, исторические и палеогеологические) о землетрясениях в Алтае-Саянской горной области. Каталоги из энергетических классов были пересчитаны в локальные магнитуды. Средний наклон графика повторяемости сравнивался с наклоном графика повторяемости для сейсмически активизированных тектонических структур. Было установлено, что он имеет близкие значения с наклоном графика для афтершоковых

процессов и существенно отличается от наклона графика повторяемости техногенных сейсмических активизаций [Еманов А.Ф. и др., 2019]. Данные представлены в таблице.

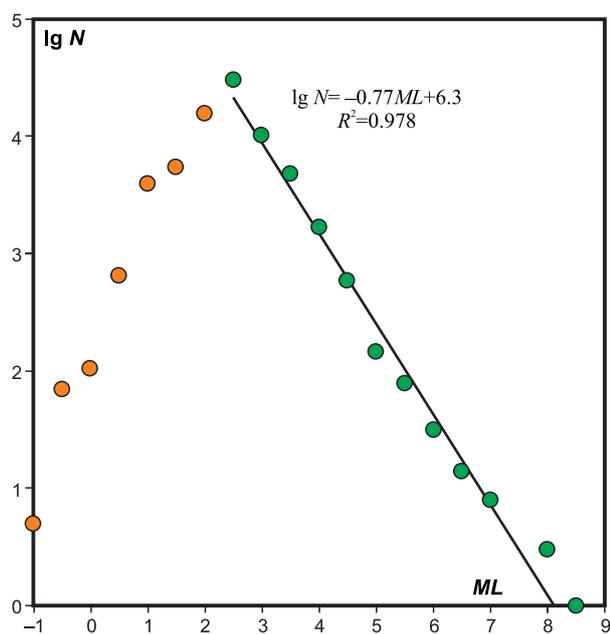


Рис. 9. График повторяемости для Алтае-Саянской горной области за период 1734–2014 гг.

Крупные землетрясения Алтае-Саянской горной области

На рис. 10 представлена карта крупнейших землетрясений Алтае-Саянской горной области. Крупнейшие землетрясения с магнитудой 7–8 происходили преимущественно на территории Монголии [Солоненко и др., 1960; Хилько и др., 1985; Молнар и др., 1995; 1998; Растворова, Цибульчик, 1984; Рогожин, 2000; Еманов А.Ф. и др., 2012а]. В данной работе мы уделим внимание некоторым из крупнейших землетрясе-

ний, произошедшим на российской территории Алтае-Саянской горной области: Чуйскому землетрясению 2003 г. с $M_s=7.3$ и сопутствующему ему Айгулакскому землетрясению 2019 г. с $ML=5.5$; Бусингольскому землетрясению 1991 г. с $M_s=6.5$; Белин-Бий-Хемскому землетрясению 2008 г. с $M_w=5.7$; Саянскому землетрясению 2011 г. с $ML=6.1$; Тувинским землетрясениям 2011 г. с $ML=6.7$ и 2012 г. с $ML=6.8$.

Крупнейшие землетрясения Алтае-Саянской горной области происходят в условиях стеснённого сжатия блоковой среды [Гольдин, Кучай, 2007; 2008]. Отличительной чертой крупных землетрясений является формирование интенсивных и длительных афтершоковых процессов. Чуйское землетрясение активизировало сдвиговую зону с 2003 г. по настоящее время, Тувинские землетрясения вызвали интенсивный афтершоковый процесс с 2011 г., медленно затухающий к настоящему времени [Еманов А.А. и др., 2016]. Бусингольское землетрясение, произошедшее на границе коллизионных процессов с процессами структур Байкальской рифтовой зоны, вызвало длительную, пульсирующую уже три десятилетия, активизацию эпицентральной области.

Бусингольское землетрясение 1991 г.

Бусингольская впадина – это западное окончание системы рифтовых впадин Байкальской зоны. Здесь закономерности фоновой сейсмичности изменяются [Еманов А.Ф. и др., 2005] с алтайского типа на байкальский, а сама граница горных систем разной фоновой сейсмичностью проходит по рифтовым впадинам: Белинской, Бусингольской и Терехольской. В них землетрясения происходят как во впадинах (байкальский тип сейсмичности), так и в горном обрамлении впадин (алтайский тип сейсмичности), однако наиболее крупные землетрясения приурочены к горному обрамлению впадин.

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

Территория	Период наблюдений	Количество событий	Коэффициент наклона графика, b	Представительная магнитуда, ML
Алтае-Саянская область	1734–2014	74992	0.77	2.5
Чуйско-Курайская зона	1734–2014	6617	0.77	2.5
Город Осинники	2005	201	1.25	1.0
Шахта «Распадская»	2010	721	1.29	0.0
Город Полысаево	2007–2009	3851	1.77	1.5
Разрез «Бачатский»	2013–2018	2482	0.96	1.0

Бусингольское землетрясение (27 декабря 1991 г., $K_p=16$, $M_s=6.5$) произошло к востоку от одноимённой впадины, в Шишхидском нагорье (рис. 11а). Афтершоковый процесс приурочен к разлому, разделяющему блоки горного обрамления и под острым углом примыкающему к Бусингольской впадине. Это оперяющий раз-

лом для Бусингольского разлома. Землетрясение привело к существенному изменению режима всей Белино-Бусингольской зоны. Возникла уникальная по длительности и пульсирующему режиму сейсмическая активизация (рис. 11б) [Еманов А.Ф. и др., 2005; 2006].

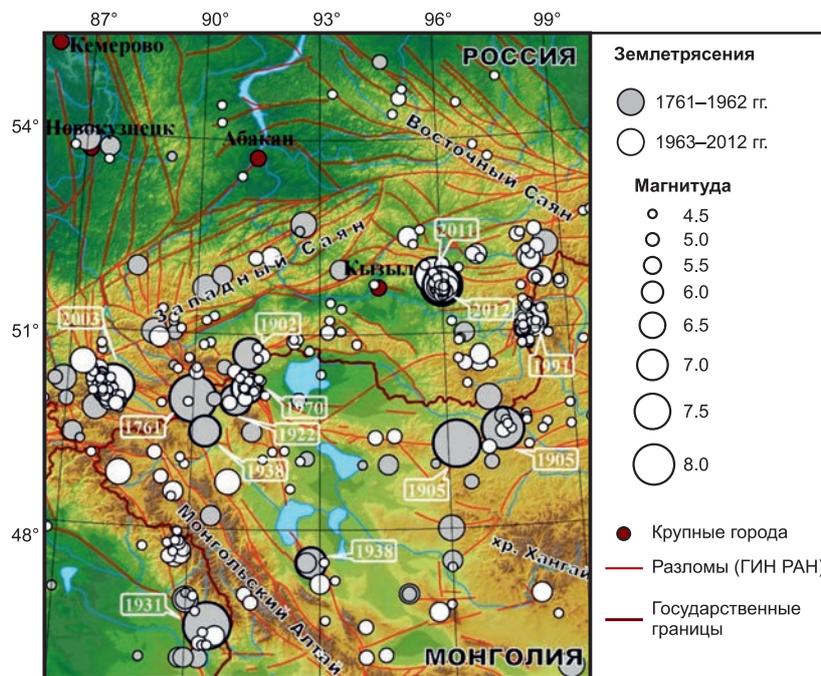


Рис. 10. Крупнейшие землетрясения Алтае-Саянской горной области

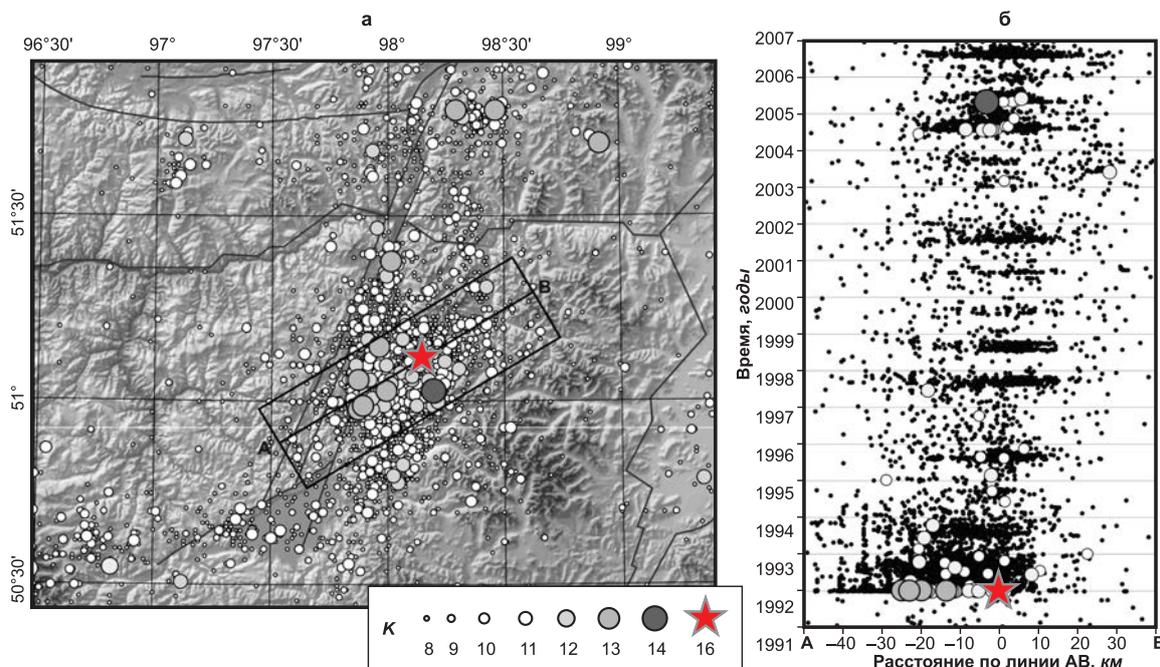


Рис. 11. Карта эпицентров землетрясений (а) и пространственно-временной анализ сейсмичности (б) Бусингольской впадины за период 1991–2007 гг.

Звёздочкой обозначен эпицентр Бусингольского землетрясения 1991 г. K – энергетический класс K_p

Сейсмическая активность пульсирует с длительностью активизаций около одного месяца и с практически ежегодными повторами, но без строгой периодичности пауз (рис. 11б). Механизм очага Бусингольского землетрясения — практически чистый сдвиг (рис. 2). Афтершоковый процесс в первый момент распространился вдоль разлома к юго-западу по направлению на впадину. Можно видеть, что последующие активизации медленно смещались вдоль разлома по направлению от впадины. С 2004 г. отмечается усиление сейсмической активности данного разлома, и до настоящего времени пульсирующая активизация продолжает существовать.

На рис. 12 представлены землетрясения Белино-Бусингольской зоны (звёздочками отмечены

эпицентры Бусингольского землетрясения на юге и Белин-Бий-Хемского — на севере). Если Бусингольская впадина прямолинейно вытянутая структура, то Белинская впадина сложно изогнута. К её изгибам приурочены сильные землетрясения с их афтершоками. На южном окончании Белинская впадина значительно сужается и огибает блок Шишихидского нагорья, выдвинутого к западу (рис. 12). Как было показано в более ранних работах [Современная геодинамика ..., 2008; Еманов А.Ф. и др., 2010], к этому блоку приурочены землетрясения 1974 г. ($M_S=5.2$) и 1999 г. ($M_S=5.0$), а их афтершоковые процессы развиваются вдоль опережающего разлома, секущего выдвинутый блок.

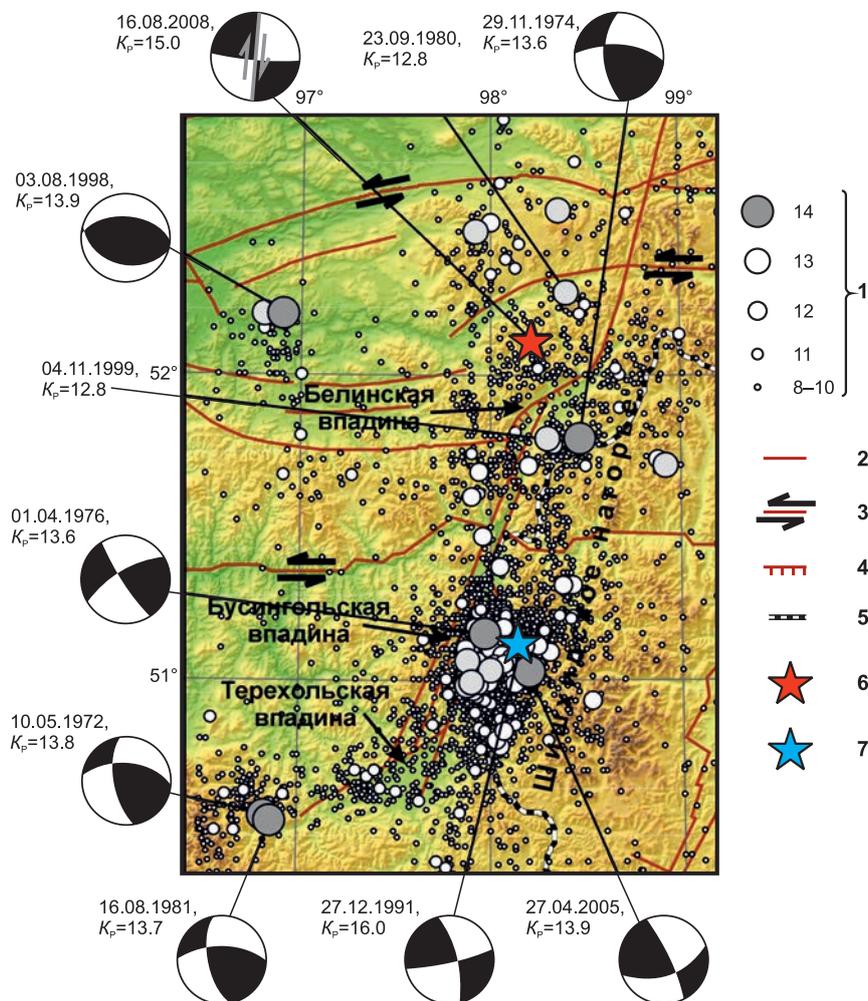


Рис. 12. Карта эпицентров землетрясений Белино-Бусингольской зоны за период 1963–2007 гг. и механизмы очагов землетрясений с $K_p > 3.5$ в проекции нижней полусферы [Еманов А.Ф. и др., 2014б].

1 – энергетический класс K_p ; 2 – разломы: 3 – сдвиги, 4 – сбросы; 5 – государственная граница; 6 – эпицентр Белин-Бий-Хемского землетрясения ($M_L=5.7$, 2008 г.); 7 – эпицентр Бусингольского землетрясения ($M_S=6.5$, 1991 г.)

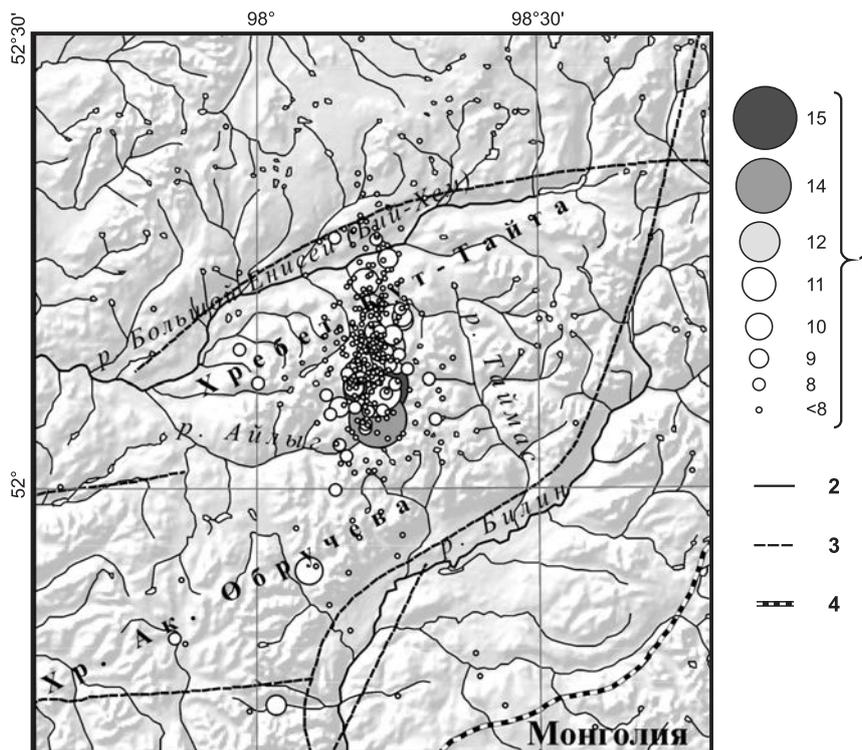


Рис. 13. Карта эпицентров Белин-Бий-Хемского землетрясения ($M_w=5.7$, 2008 г.) и его афтершоков.

1 – энергетический класс K_p ; 2 – реки; 3 – разломы; 4 – государственная граница

Белин-Бий-Хемское землетрясение 2008 г.

Белин-Бий-Хемское землетрясение (16 августа 2008 г., $K_p=15$, $M_w=5.7$) произошло в горном обрамлении в районе изгиба Белинской впадины в восточном направлении (рис. 13). Афтершоковый процесс развивался поперёк главных разломов, ограничивающих блок с севера и с юга, кинематика северного разлома – сдвиговая, южного – растяжение (рис. 14) [Еманов А.Ф. и др., 2014в].

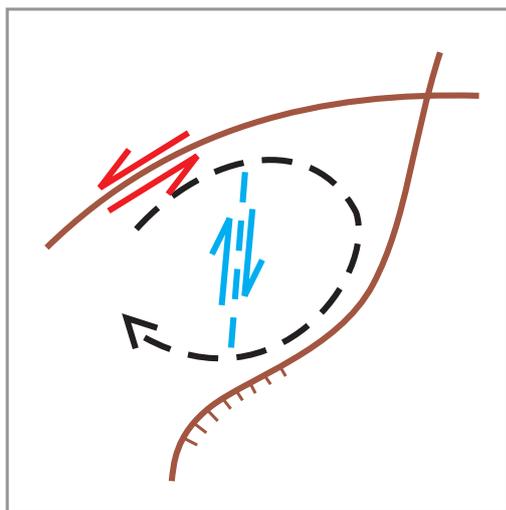


Рис. 14. Модель Белин-Бий-Хемского землетрясения – сдвиг с вращением блока

В соответствии с имеющимися геологическими данными [Парфеевец, Саньков, 2006] и данными об афтершоках составлена модель Белин-Бий-Хемского землетрясения, представляющая собой сдвиг с вращением блока (рис. 14), что по сейсмологическим данным подтверждает утверждение [Парфеевец, Саньков, 2006] о взаимном проникновении в пограничной области структур коллизионной и рифтовой природы. В самой структуре Белинской впадины отражается воздействие на неё коллизионных процессов с выраженным стремлением горизонтальных движений обогнуть систему рифтовых впадин с севера.

Тувинские землетрясения 2011 и 2012 гг.

Тувинские землетрясения (27 декабря 2011 г. с $M_L=6.7$ и 26 февраля 2012 г. с $M_L=6.8$) произошли в районе Каахемского разлома в отрогах горной системы хребта Обручева. Исследования показали, что ведущую роль в создании напряжённого состояния сыграл процесс медленного выдвигания клинообразного хребта Бидык к северу [Еманов А.Ф. и др., 2014а; 2014б].

На рис. 15 и 16 представлены карты эпицентров и плотности афтершоков Тувинских землетрясений. Тувинское-I землетрясение 2011 г. (механизм очага – сдвиг) произошло в северной части активизированной области и сформировало

линейно вытянутый вдоль Каахемского разлома афтершоковый процесс. Через два месяца на южном окончании произошло Тувинское-II землетрясение 2012 г. (механизм очага – взброс). Афтершоковая область получила развитие преимущественно по двум разломам, ограничиваю-

щим блок хребта Ыдык. По геологическим данным [Аржанникова, Аржанников, 2014] этот блок выдвигается в северном направлении продолжительное время, что отражается и в столообразном смещении русла реки Каа-Хем (Енисей) (рис. 15).

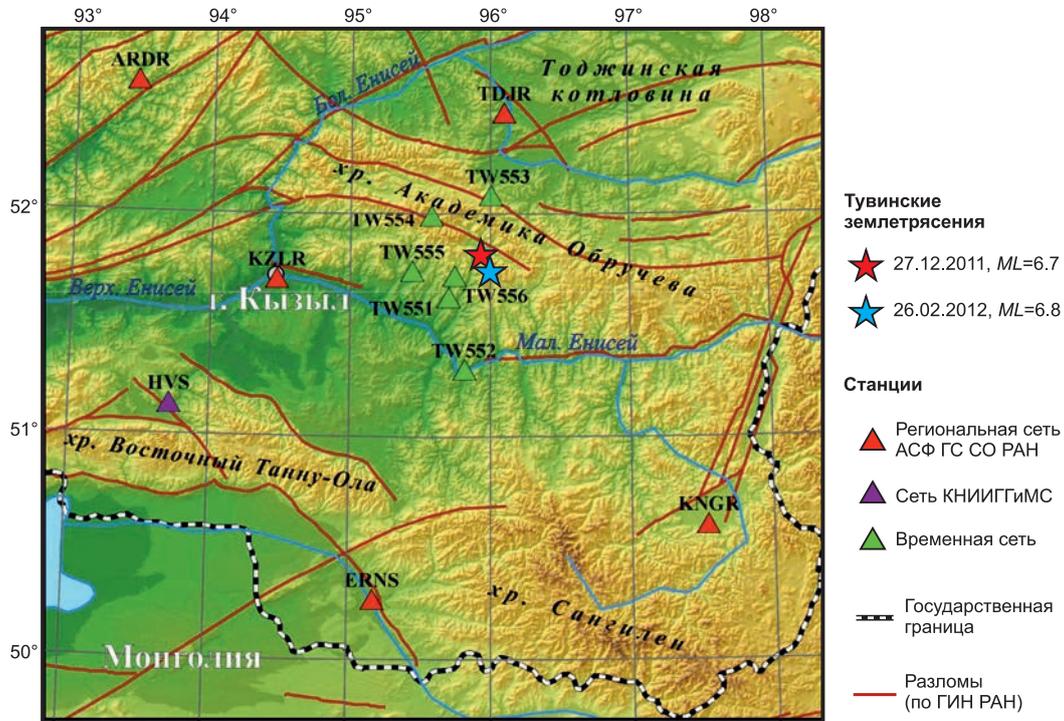


Рис. 15. Карта сети станций в районе Тувинского-I и Тувинского-II землетрясений и их эпицентры

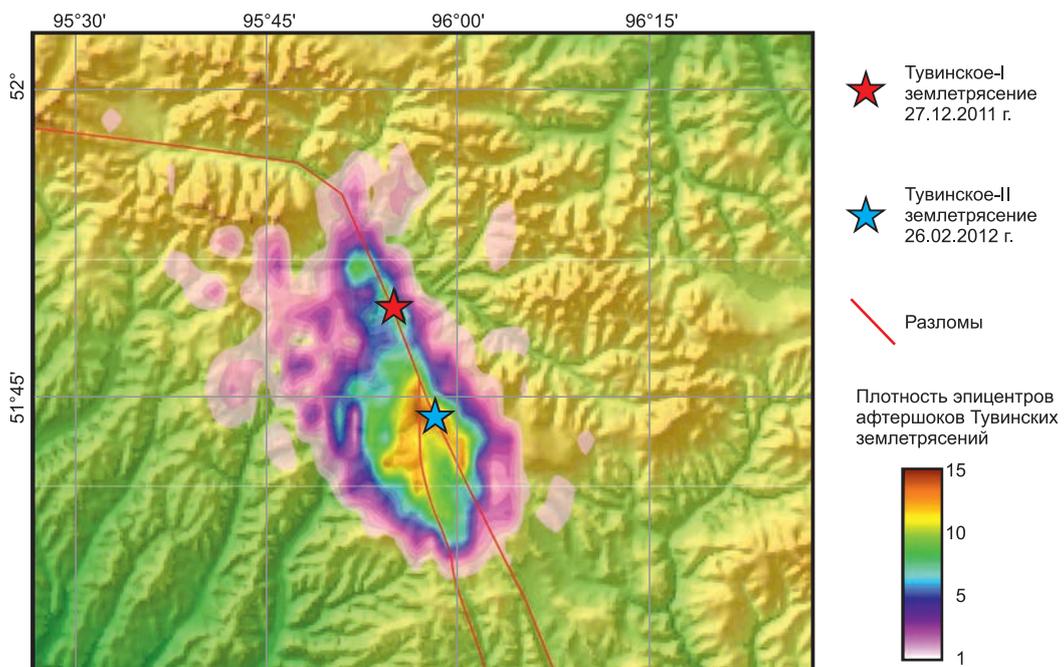


Рис. 16. Карта плотности афтершоков Тувинских землетрясений и Каахемский разлом.

В расчёты взяты землетрясения с $M_L \geq 3$ по сетке 1×1 км

Каахемский разлом имеет сложное строение. Он то проявляет себя как узкая разломная зона, то разветвляется на почти параллельные ветви, то фиксируется как последовательность прерывающихся разрывов [Аржанникова, Аржанников, 2014].

Тувинское-I землетрясение произошло на прямолинейном участке Каахемского разлома и перед его изгибом на запад. Область распространения афтершоков сконцентрирована вдоль линии разлома и останавливается около изгиба Каахемского разлома. Если Тувинское-I землетрясение было сдвигом, то Тувинское-II – это взброс [Еманов А.Ф. и др., 2014а]. Очаг Тувинского-II землетрясения находится в районе разветвления Каахемского разлома на две ветви, являющиеся границами хребта Ыдык, как отмечено выше, выдвигающегося к северу. Наибольшая плотность афтершоков отмечается вдоль бортов блока хребта Ыдык. Понятно, что ведущую роль в создании напряжённого состояния сыграл процесс медленного выдвигания клинообразного хребта Ыдык к северу [Еманов А.Ф. и др., 2014а; 2014б]. Полученные сейсмологические данные об афтершоковом процессе соответствуют исследованиям разрывов дневной поверхности в очаговой области [Овсяченко и др., 2016].

Временная сеть станций, установленная в эпицентральной зоне сразу после Тувинского-I землетрясения и более чем за месяц до Тувинского-II, позволила с высокой точностью определять глубины событий.

На рис. 17 представлены вертикальные разрезы афтершоковой области Тувинских землетрясений. К северу от эпицентра главного события наблюдалась наибольшая афтершоковая активность, а на разрезе рис. 17а зафиксированы толь-

ко остатки этой активности в виде вытянутой от очага к дневной поверхности наклонной полосы, заполненной гипоцентрами событий. Наибольшее число событий перед Тувинским-II землетрясением происходит на двух участках. Один накрывает эпицентр главного события афтершоками 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.

Другая особенность, которую можно отметить из рис. 17, это то, что до Тувинского-II землетрясения основная масса событий происходит до глубин 20 км, а после него – до глубин 30 км, в то время как второе землетрясение имеет меньшую глубину.

Землетрясение Тувинское-II в значительной степени изменило пространственную структуру афтершокового процесса. Во-первых, очаг Тувинского-II землетрясения находился за краем наиболее активного участка афтершоков Тувинского-I землетрясения, во-вторых, очаг Тувинского-I землетрясения локализуется с краю от наиболее активизированной области после Тувинского-II землетрясения, в-третьих, полоса (в разрезе) землетрясений с глубинами менее 10 км ослабла с севера и продвинулась к югу [Еманов А.Ф. и др., 2017б]. В целом два землетрясения сформировали единую сейсмическую активизацию в районе Каахемского разлома и афтершоковую область, слившуюся в одно целое как результат одного и того же тектонического процесса, обеспечившего выдвигание к северу блока земной коры (хребет Ыдык).

Саянское землетрясение 2011 г.

Саянское землетрясение (10 февраля 2011 г., $K_p=13.9$, $M_L=6.1$) произошло в одноимённом

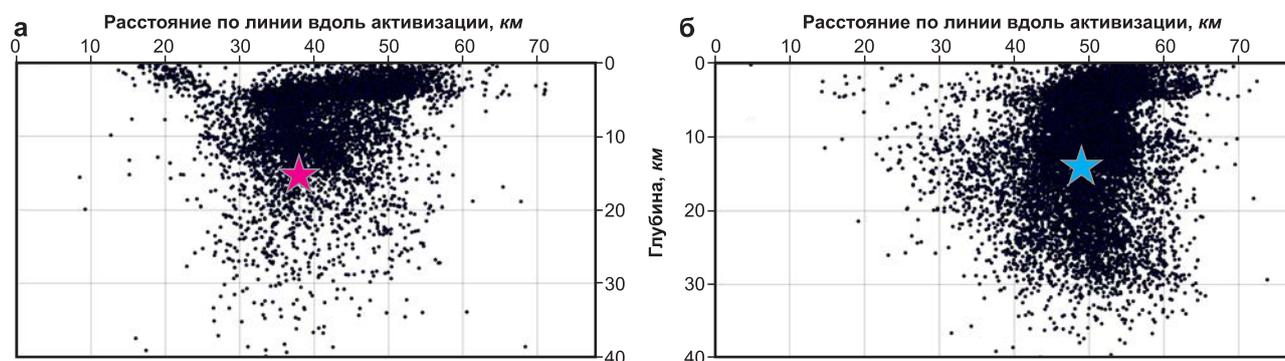


Рис. 17. Вертикальные срезы вдоль Каахемского разлома с гипоцентрами афтершоков: а – гипоцентр Тувинского-I землетрясения (глубина 17 км) и афтершоков в промежутке от 9 февраля 2012 г. (с момента начала работы сети временных станций) и до Тувинского-II землетрясения 26 февраля 2012 г.; б – гипоцентр Тувинского-II землетрясения (глубина 14 км) и афтершоков после него до 14 марта 2012 г.

хребте, входящем в горную систему Западного Саяна (рис. 18). В эпицентральной зоне были организованы исследования с сетью временных станций (рис. 19). На рис. 18 видно, что вдоль центральной части хребта расположены эпицентры наиболее крупных землетрясений,

а слабые землетрясения отсутствуют. Землетрясения малых энергий приурочены к приграничным областям горной системы с Тувинской котловиной. Афтершоковый процесс Саянского землетрясения развивался поперёк горного хребта (рис. 19). Сопоставляя данные о сильных

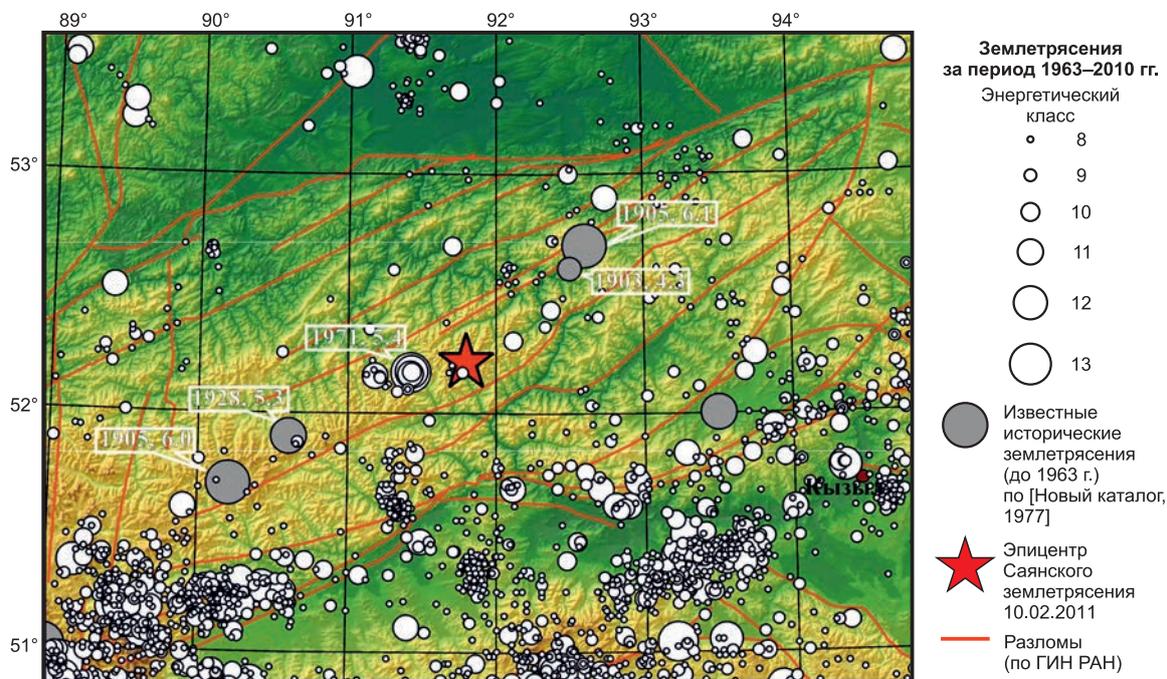


Рис. 18. Карта эпицентров землетрясений Западного Саяна за период 1963–2010 гг. и известных исторических землетрясений

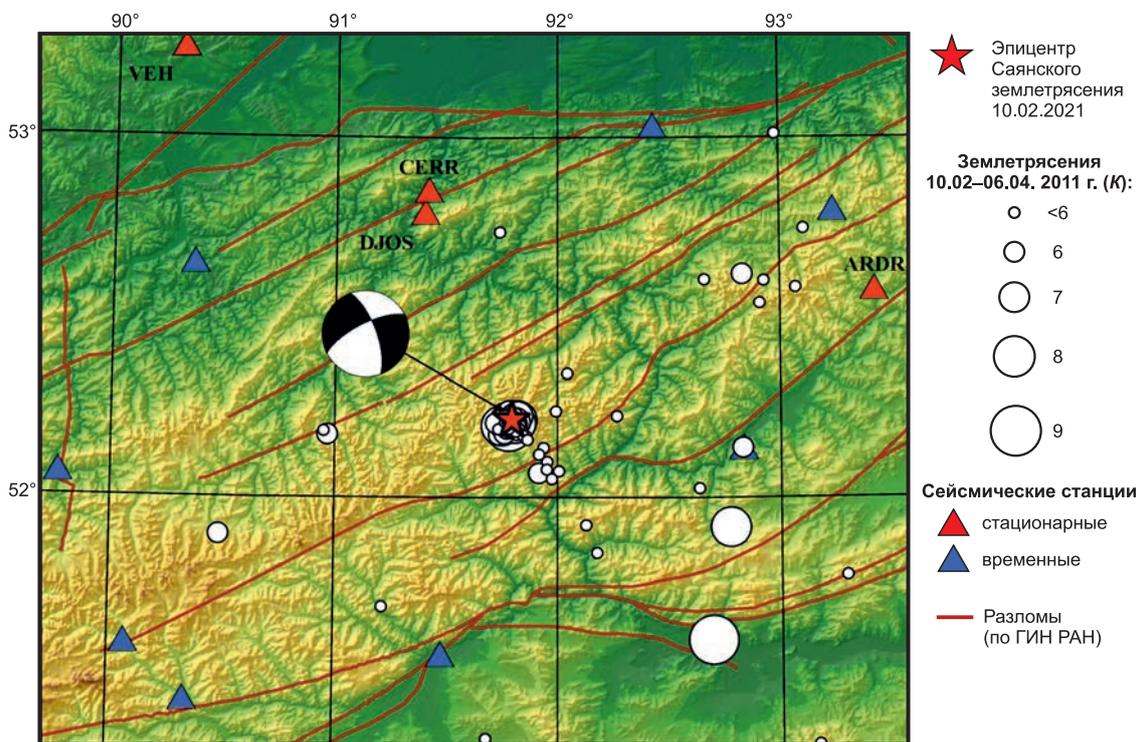


Рис. 19. Саянское землетрясение и его афтершоки с 10.02.2011 г. по 06.04.2011 г.

и слабых землетрясениях и об афтершоках, можно предполагать, что сейсмичность Западного Саяна в значительной степени может объясняться неравномерным воздействием блочных структур Тувинской котловины на Западный Саян. Известно, что скорость вертикальных движений Западного Саяна на порядок меньше, чем скорость вертикальных движений на Алтае и в Байкальской рифтовой зоне [Зятыкова, 1977]. Если бы сейсмичность развивалась в соответствии со скоростями вертикальных движений, то Западный Саян обладал бы значительно более спокойным сейсмическим режимом. Выдвижение блоков Тувинской котловины к северу с разной скоростью приводит к неравномерности воздействия на Западный Саян и к активизации время от времени поперечных разломов, обычно спокойных в фоновом режиме развития сейсмичности.

**Развитие сейсмической активизации
в Республике Алтай в период после Чуйского
землетрясения 2003 г.,
Айгулакское землетрясение 2019 г.**

Чуйское землетрясение 2003 г. с $M_s=7.3$ произошло в Чуйско-Курайской зоне Горного Алтая в центре сети станций Алтайского сейсмологического полигона [Еманов А.Ф. и др., 2003б]. На протяжении почти двух десятилетий ежегодно в данном районе выставлялись десятки временных станций с целью получения высокоточной и детальной информации о развитии афтершоков и о процессах релаксации в районе крупного землетрясения. Детальные данные о структуре афтершоков и фазах развития афтершокового процесса были опубликованы в работах [Еманов А.А. и др., 2009а; Еманов А.Ф. и др., 2021], а сведения о разрывах поверхности и геологической позиции очага [Рогожин и др., 2007; Лунина и др., 2006].

Структура афтершоков испытывала наибольшие изменения в первые дни под влиянием наиболее сильных афтершоков с магнитудами 6.4 и 6.7 [Еманов А.А. и др., 2009б]. В дальнейшем наблюдался период около десяти лет, когда структура афтершоковой области была стабильна, а в сейсмичности Алтая афтершоковая область была доминирующей. Структуры сейсмически активизированных разломов представлены в работе [Еманов А.Ф. и др., 2021].

В данной работе рассматривается вопрос о влиянии Чуйского землетрясения на последующее развитие сейсмичности Горного Алтая.

На рис. 20 даны карты эпицентров землетрясений в Чуйско-Курайской зоне, демонстрирующие начальный период процесса релаксации напряжённого состояния недр после Чуй-

ского землетрясения [Еманов А.Ф. и др., 2017а]. На рис. 20а представлена сейсмичность за 40 лет до Чуйского землетрясения. Крупных землетрясений в этот период нет, достаточно активны Курайский и Айгулакский хребты. После Чуйского землетрясения (рис. 20б) за шесть лет вся сейсмичность Чуйско-Курайской зоны сосредоточена в области афтершоков Чуйского землетрясения. На карте землетрясений за 2015 г. видна сейсмическая активизация смежных геологических структур при том, что афтершоковая область продолжает быть активной. В 2015 г. произошло Южно-Чуйское землетрясение с $ML=6.0$, вызвавшее в Южно-Чуйском хребте кратковременный и не очень сильный афтершоковый процесс. Наблюдается сейсмическая активность в Северо-Чуйском, Курайском и Айгулакском хребтах. В 2016 г. сейсмическая активность смежных геологических структур с афтершоковой областью Чуйского землетрясения продолжилась.

В районе Айгулакского хребта в 2019 г. произошли два крупных землетрясения 13 сентября в 01:29 с $ML=5.5$ и в 04:29 с $ML=5.2$, за которыми последовал мощный афтершоковый процесс (рис. 21). В течение последующего времени до конца 2019 г. было зафиксировано около 2.5 тыс. землетрясений в этой зоне, в том числе пять землетрясений в диапазоне $4 < ML < 5$, и сейсмическая активизация продолжается. Землетрясения произошли в период работы временной сети станций в Чуйско-Курайской зоне. В результате получены представительные и точные сведения о сейсмичности этой зоны Горного Алтая.

На рис. 22 в разрезе представлено положение гипоцентров землетрясений. 0 на горизонтальной оси соответствует эпицентру Чуйского землетрясения. В интервале расстояний (–70)–(–55) км фиксируются афтершоки Айгулакского землетрясения. Они непрерывно заполняют интервал глубин от первых километров до 20 км. В разрезе видно, что эпицентральная область Чуйского землетрясения на данный момент существенно менее активна, чем Айгулакского.

На рис. 23 представлена карта суммарной сейсмической энергии Алтая за 2020 год. Кроме сейсмической активизации смежных с афтершоковой областью Чуйского землетрясения геологических структур наблюдаются повышение сейсмической активности в радиусе 180–200 км от эпицентра Чуйского землетрясения и незначительные проявления сейсмичности внутри круга. Максимум сейсмической энергии выделяется в эпицентральном районе Айгулакского землетрясения.

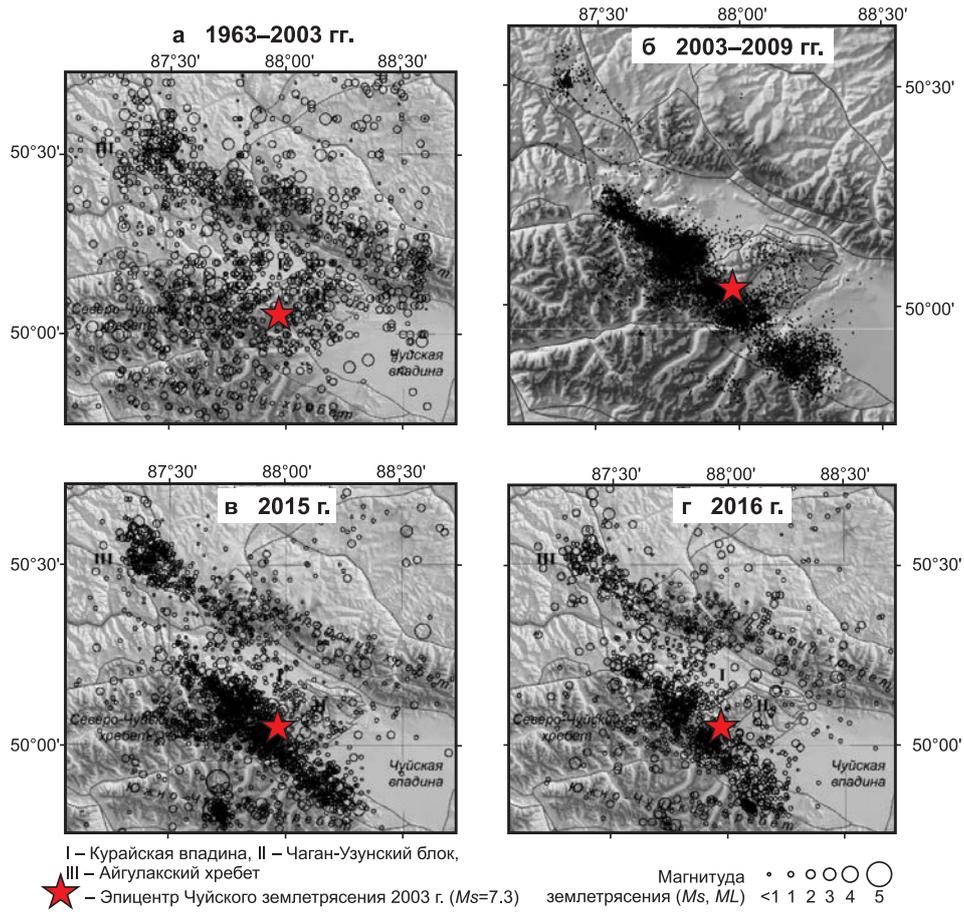


Рис. 20. Изменение сейсмичности Чуйско-Курайской зоны Горного Алтая во времени

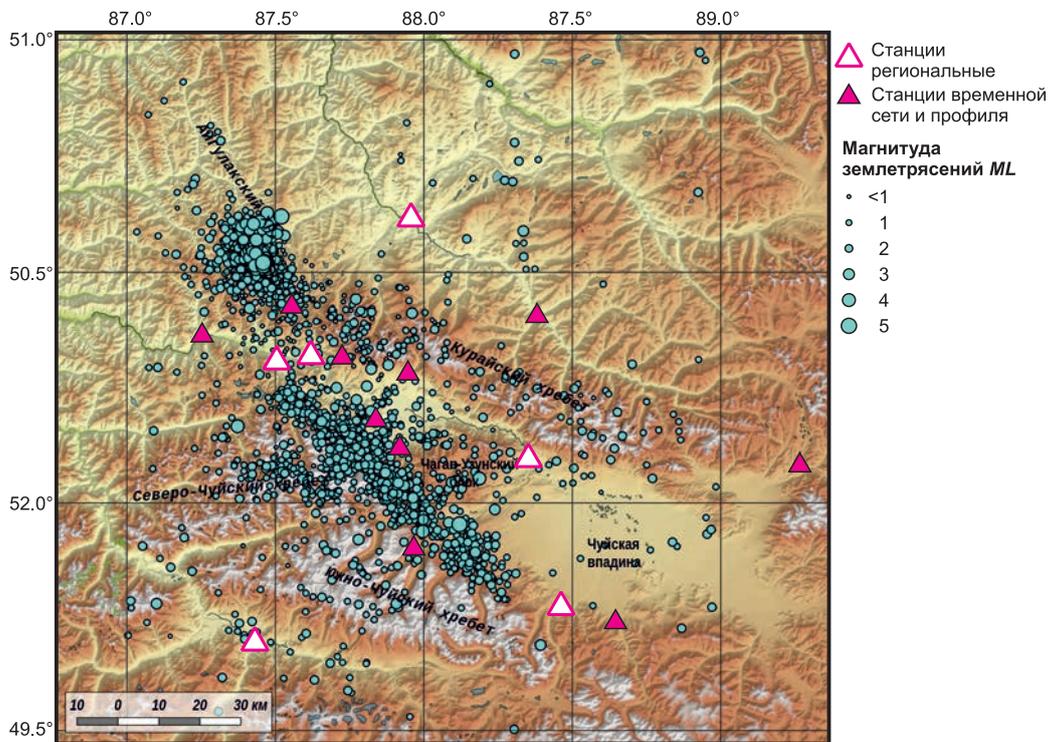


Рис. 21. Айгулакское землетрясение 2019 г. с $M_L=5.5$ в структуре сейсмичности Чуйско-Курайской зоны



Рис. 22. Разрез по линии вдоль сейсмических активизаций (северо-запад – юго-восток) Чуйского и Айгулакского землетрясений в 2019 г.

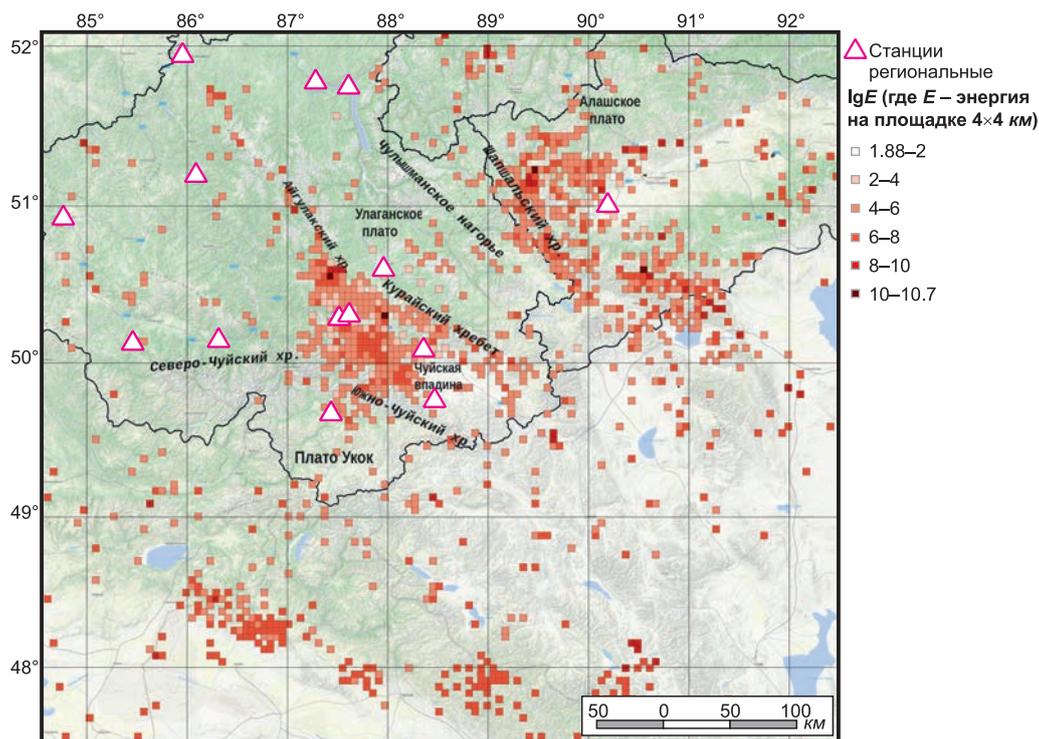


Рис. 23. Карта суммарной сейсмической энергии Горного Алтая за 2020 г.

От эпицентра Айгулакского землетрясения вдоль одноимённого хребта вытянулась прерывистая цепь проявлений сейсмичности почти до г. Горно-Алтайска. Слабые проявления сейсмичности разбросаны по всей северной части Алтая. Фактически наблюдается эволюция сейсмичности как результат воздействия на горную систему крупного землетрясения 2003 года.

Об эволюции сейсмичности в Алтае-Саянской горной области

Сейсмологические исследования в Алтае-Саянской горной области позволили сформировать представления об основных закономерностях развития фоновой сейсмичности и возникновения крупных землетрясений в регионе.

Сейсмичность Алтае-Саянской области формируется под воздействием коллизионных процессов, вызванных столкновением Индии с Евразией, и лишь на восточном фланге появляются впадины (Белинская, Бусингольская и Терехольская), где коллизионная тектоника и рифтовые процессы сопоставимы по силе, а за ними выстраивается система впадин, где доминируют рифтовые механизмы формирования сейсмичности.

Фоновая сейсмичность, на первый взгляд хаотичная, с течением времени упорядочивается в соответствии с блочной структурой Алтае-Саянского региона, концентрируясь преимущественно в горном обрамлении впадин. Система впадин Алтае-Саянской области, являясь более крупными, прочными блоками, чем блоки

раздробленных горных хребтов, оказывает сопротивление коллизионным процессам, и фоновая сейсмичность приурочена в основном к разрушающимся при этом горным обрамлениям, а также к редким линейным разломам, секущим впадины.

Наблюдаются стабильность проявления тектонических процессов в фоновой сейсмичности и иерархия этих процессов по скорости проявления в сейсмичности. Геологические структуры с наиболее быстро протекающими тектоническими процессами уже в течение года проявляются в фоновой сейсмичности, основные черты которой повторяются из года в год. Разделение структур по скорости проявления в фоновой сейсмичности проливает свет на напряжённое состояние блоков земной коры.

Крупные землетрясения формируются как нестационарные процессы в проявлении сейсмичности и связаны с блоковыми движениями в условиях стеснённого сжатия.

Крупные землетрясения в Западном Саяне и в хребте Обручева связаны с выдвиганием блоков к северу по поперечным к этим структурам разломам.

На востоке Алтае-Саянской горной области крупные землетрясения увязываются с процессами смещения и вращения блоков земной коры около рифтовых впадин. Бусингольское землетрясение является уникальным по длительности афтершокового процесса и пульсирующему характеру. Процесс развивается около трёх десятилетий со смещением активизации вдоль оперяющего разлома к магистральному Бусингольскому разлому.

После десятилетия развития интенсивного афтершокового процесса Чуйского землетрясения в устойчивой структуре начался период релаксации: сейсмическая активизация смежных с эпицентром структур на удалении 60–80 км от очага; активизация дальних по радиусу структур на удалении 280–300 км от очага. Центр наибольшей сейсмической активности сместился из эпицентра Чуйского землетрясения в эпицентр Айгулакского землетрясения 2019 г., в смежную с Чуйским землетрясением геологическую структуру.

Активный вибросейсмический мониторинг

В течение нескольких десятилетий в Алтае-Саянском регионе на Быстровском вибросейсмическом полигоне АСФ ФИЦ ЕГС РАН выполняются испытания искусственных управляемых источников сейсмических волн, предназначенных для исследования внутренних оболочек Земли, проведения экспериментальных

исследований по ряду фундаментальных проблем геофизики (таких, как исследование напряжённого и метастабильного состояний твёрдой среды), разработки и опробования новых методов выявления предвестников опасных сейсмических событий, изучения нелинейных взаимодействий геофизических полей разной природы и др. [Алексеев и др., 2002; 2004; 2010; Еманов А.Ф. и др., 1999]. На полигоне испытываются новые технологии, предназначенные для внедрения в производство геофизических исследований земной коры: глубинных вибросейсмических исследований, инженерно-геофизических исследований, изучения сейсмостойкости зданий и сооружений, калибровки станций международной сейсмологической сети и др. Во многих из упомянутых направлений за годы существования полигона получены выдающиеся результаты мирового уровня [Алексеев и др., 2002; 2004; 2010; Селезнев и др., 2018].

Одной из главных тем исследований, которые начались фактически сразу после установки 100-тонного вибратора на Быстровском полигоне в начале 80-х годов прошлого столетия, были режимные вибросейсмические наблюдения (рис. 24а). Первые эксперименты по изучению повторяемости волнового поля выполнялись в ближней зоне и на удалении 20 км от вибратора ЦВ-100 (рис. 24б). С 1996 по 2004 г. со 100-тонным вибратором проводились регулярные наблюдения с интервалом в 7–10 дней на сеймостанции «Новосибирск» на удалении ~50 км; в последующем, по настоящее время, режимные наблюдения выполняются с 40-тонным вибратором ЦВ-40 (рис. 24в) [Алексеев и др., 2002; 2004; 2010; Еманов А.Ф. и др., 1999].

За длительный период вибросейсмических исследований в северо-западной части Алтае-Саянского региона отработаны методика и техника режимных наблюдений, изучены волновые поля от вибраторов на удалениях до 445 км и прохождение монохроматических сигналов по площади на удалениях до тысячи километров [Алексеев и др., 2002; 2004; 2010; Чичинин, Юшин, 2018]. Результаты неоднократных многодневных экспериментов показали, что по кинематическим параметрам повторяемость волновых полей в ближней и дальней зоне составляет 10^{-3} с (рис. 25) [Алексеев и др., 2004; Селезнев и др., 2018; Соловьев и др., 2005]. Это на порядок меньше выявляемых по данным мониторинга сезонных вариаций кинематических параметров P - и S -волн по трассе Быстровка-Ключи вдоль Новосибирского водохранилища [Алексеев и др., 2010; Соловьев и др., 2005].

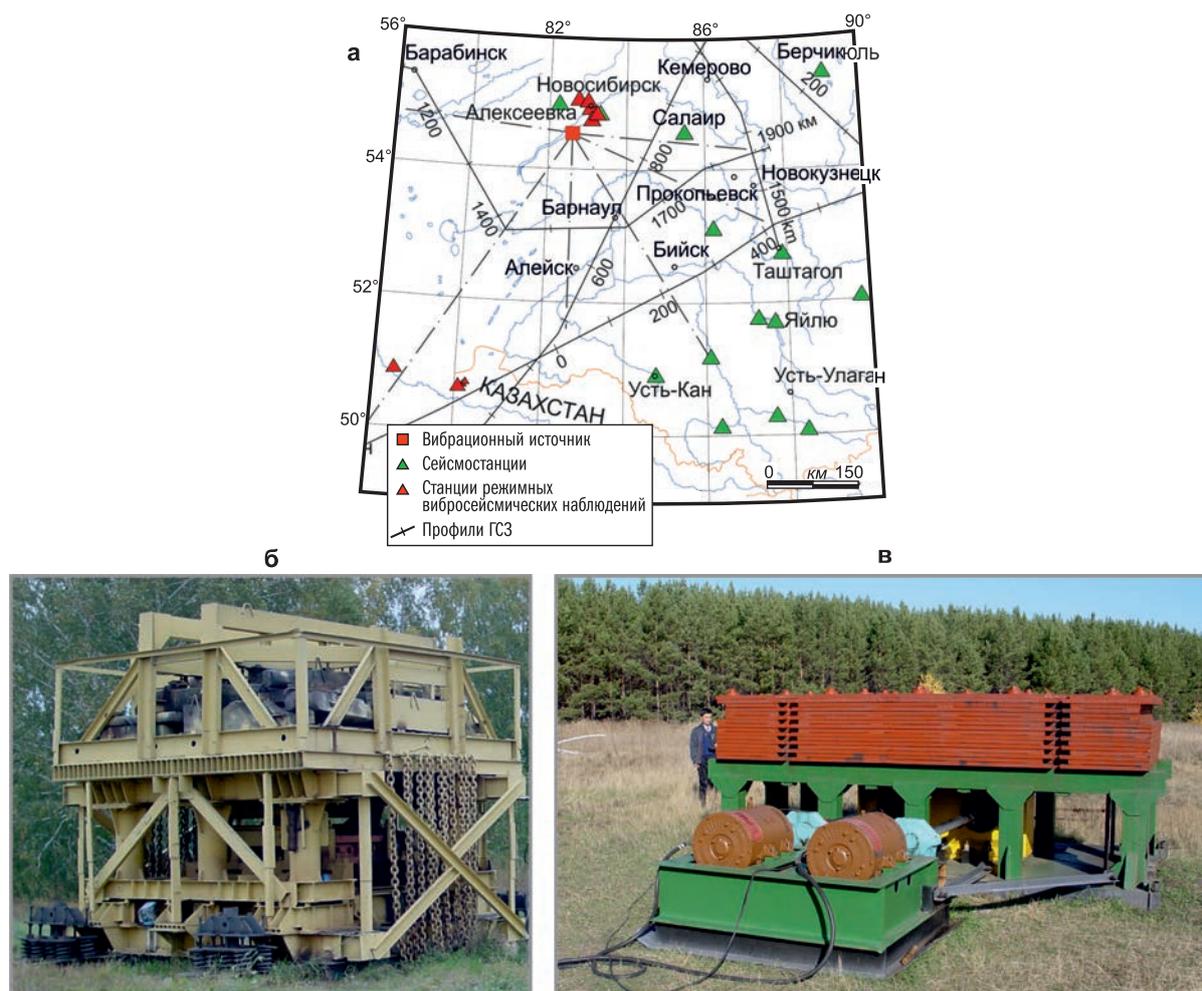


Рис. 24. Вибросейсмические исследования в Алтае-Саянском регионе:
а – схема; б, в – виброисточники ЦВ-100 и ЦВ-40 соответственно

Параллельно с проведением режимных вибросейсмических наблюдений в контрольных точках («Новосибирск» NVS, «Салаир» SAL, «Алексеевка» ALXA) на удалении до 200 км (рис. 24а) проводились исследования на площадной сети в северо-западной части Алтае-Саянского региона с целью выбора точек для режимных вибросейсмических просвечиваний. Станции должны быть приближены к зонам повышенной сейсмичности, в них получены хорошие коррелограммы с записями опорных волн, вариации кинематических и динамических параметров которых содержали информацию о природных и техногенных процессах в просвечиваемой среде и, наконец, должны быть низкие затраты на их установку и обслуживание. Последнее немаловажно, так как полноценное содержание стационарной сейсмологической станции требует больших затрат.

Зоны повышенной сейсмичности в Алтае-Саянском регионе – Алтай, Саяны. Проведён анализ прохождения монохроматических

сигналов на сейсмостанциях Алтае-Саянского региона на удалении до 1200 км от вибратора ЦВ-40 (полигон «Быстровка»). Из записей станций вырезаны сеансы, проходившие в период 2016–2017 гг., совпадающие по времени с работой вибратора в монохроматическом режиме, и по ним строились амплитудные спектры. Каждая компонента станции считалась отдельно. Использовались шесть излучаемых по 15 мин монохроматических сигналов в оптимальном для вибратора ЦВ-40 диапазоне излучения: 8.0, 8.5, 9.0, 9.5, 10.0 и 10.5 Гц. Отдельно по каждой из шести частот был построен график амплитуды спектра от удаления. Количество суммированных сеансов в среднем составляет на хорошо работающих станциях до 25–26 сеансов в год. Общее количество обработанных (и проанализированных) монохромов на трёх компонентах за 2016–2017 гг. составило порядка 20000. Примеры амплитудных спектров по некоторым компонентам на отдельных сейсмостанциях и сводные

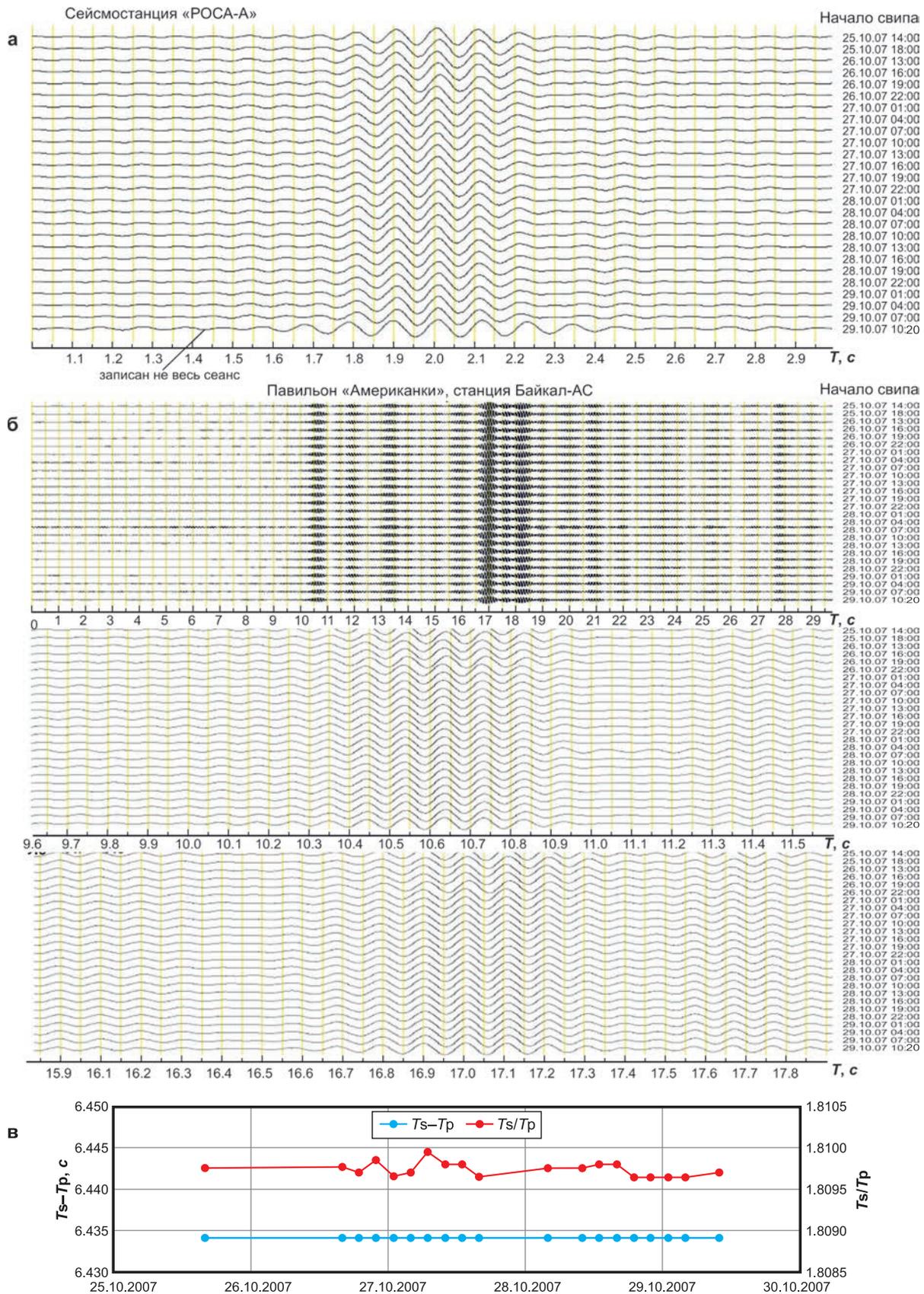


Рис. 25. Оценка повторяемости и точности вибросейсмического мониторинга: а, б – примеры волновых полей от вибратора ЦВ-40 в ближней и дальней (сейсмостанция «Новосибирск») зоне при четырёхдневном эксперименте; в – графики разности (нижний график) и отношений (верхний график) времён регистрации P - и S -волн, зарегистрированных в стационарном павильоне

графики отношений амплитуд монохромов к среднеквадратическим амплитудам шумов от удалений для Алтае-Саянского региона приведены на рис. 26 и 27.

На рис. 27 представлены данные для всех (X, Y, Z) компонент. Из рис. 27а видно, что монохром 10.5 Гц хорошо проходит (отношение два и более) до удалений $440\text{--}450 \text{ км}$ и даже регистрируется на удалении 620 км . Однако для получения качественных коррелограмм это недостаточно, необходимо прохождение сигналов на разных частотах.

Так, из рис. 27б (в увеличенном масштабе) видно, что на удалении свыше 1000 км (станция

«Эрзин») выделяются монохромы на частоте 9.5 Гц с отношением более 2 на каналах Z и E , однако на частоте 10.5 Гц с отношением ~ 1.8 монохром выделяется только на канале N , а на других каналах отношение около 1 и менее. На частоте 8.5 Гц монохром вообще не проявляется (рис. 27б). Получить качественные коррелограммы при таком слабом прохождении сигналов на разных частотах не представляется возможным. Примерно такая же ситуация с прохождением монохромов на станции «Черёмушки» (CERR, $\sim 618 \text{ км}$ на рис. 27). Хорошее прохождение монохрома на частоте 10.5 Гц при регистрации на Z -канале и слабое прохождение на других частотах.

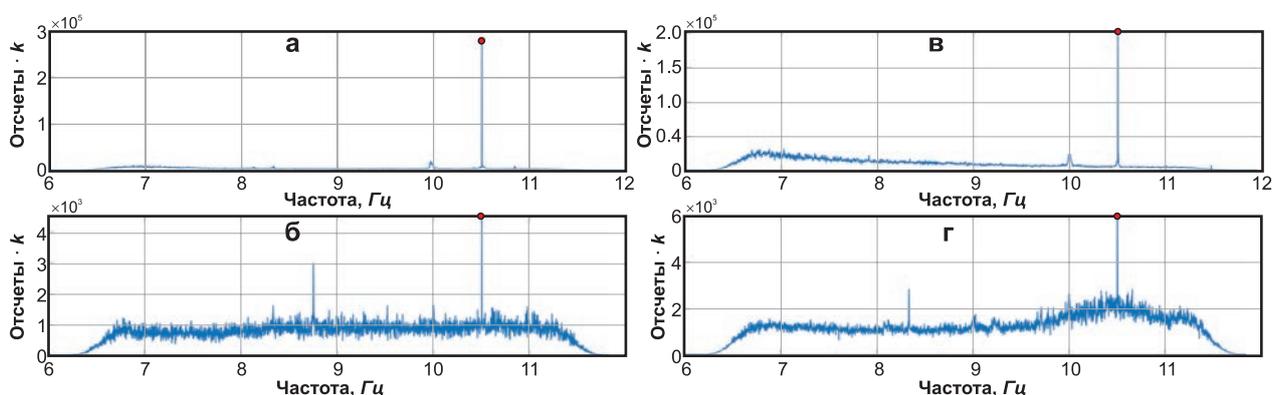


Рис. 26. Примеры регистрации монохроматических сигналов (10.5 Гц) от вибратора ЦВ-40 на сейсмостанциях: NVS (а), SALR (б), ELDR (в), ARTR (г)

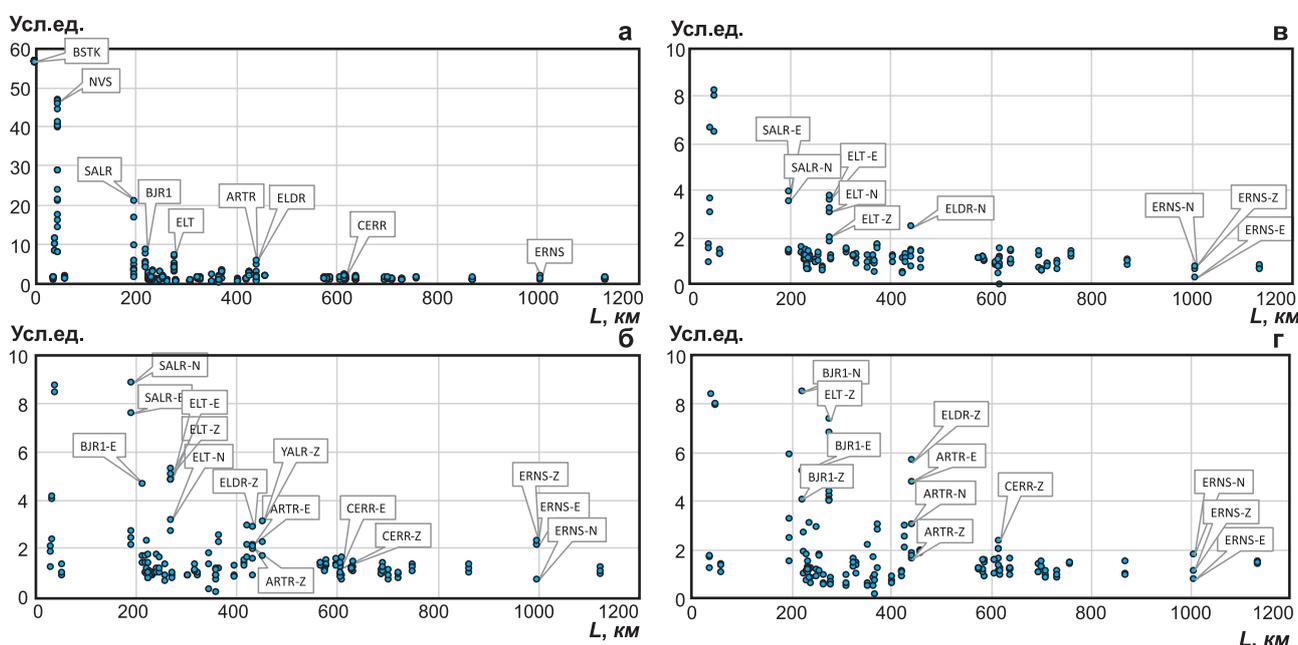


Рис. 27. Графики отношений амплитуд монохромов к среднеквадратическим амплитудам шумов в диапазоне $6\text{--}12 \text{ Гц}$ в зависимости от удалений: а – сводный график для частоты 10.5 Гц за 2016–2017 гг.; б–г – соответственно графики для частот $8.5, 9.5$ и 10.5 Гц за 2017 г.

NVS, SALR, ELDR, ELT, ARTR, CERR, ERNS, BJR1 – соответственно сейсмические станции «Новосибирск» (50 км), «Салаир» (200 км), «Еланда» (442 км), «Ельцовка» (279 км), «Артыбаш» (442 км), «Черёмушки» (618 км), «Эрзин» (1008 км), «Бачатский-1» (222 км)

По результатам проведённого анализа прохождения монохроматических сигналов на сейсмостанциях Алтае-Саянского региона установлено, что хорошее накопление монохромов от вибратора ЦВ-40 на нескольких частотах осуществляется на ряде станций до удалений ~450 км (рис. 26, 27). Наиболее оптимальными для вибросейсмического мониторинга могут быть сейсмостанции Усть-Кан, Яйлю и Еланда, находящиеся вблизи зон с повышенной сейсмичностью на юге Алтая (рис. 24а).

В последние годы значительно выросла роль техногенных факторов в возникновении сейсмичности, о чём в частности свидетельствует крупное техногенное землетрясение в районе разреза Бачатский в Кузбассе с $ML=6.1$ в 2013 г. [Еманов А.Ф. и др., 2020]. Новая осязательная активизация проявилась в последние годы уже в районе Новосибирска (Горловское месторождение угля), где зафиксированы осязательные техногенные землетрясения с магнитудой 3.7 в 2017 г., 3.9 – в 2018 г., 4.3 – в январе 2019 г. и 4.1 – в сентябре 2020 года. С целью обеспечения лучшей представительности регистрации землетрясений в районах разработки крупных угольных разрезов создаются локальные микрогруппы до 10–20 станций. Подобная локальная сеть в течение нескольких лет работает в Кузбассе. В 2017 г. начато создание локальной микрогруппы в районе Колыванского угольного разреза между Искитимом и Академгородком. Получены первые сейсмограммы и ряды наблюдений на станции ВJR1 (222 км от вибратора ЦВ-40) в районе Бачат-

ского разреза и на станциях «Елбаши», «Харино» и «Усть-Чем» в районе Колыванского разреза НСО на удалениях 60–68 км от вибратора (рис. 28, 29).

Можно надеяться, что накопление рядов режимных вибросейсмических наблюдений на этих станциях в непосредственной близости от Бачатского и Колыванского разрезов (не более 6–10 км) позволит отследить процесс подготовки осязательных техногенных землетрясений в осадочной толще угледобывающих карьеров, тем более что трасса мониторинга на станцию «Усть-Чем» фактически проходит через сам разрез. В период отсутствия сезонных вариаций (6 летне-осенних месяцев) могут быть наиболее информативными динамические параметры, более чувствительные, чем кинематические, к изменениям напряжённо-деформированного состояния сред [Алексеев и др., 2004; Селезнев и др., 2018; Соловьев и др., 2005]. Привлечение для вибромониторинга других сейсмологических станций Алтае-Саянского региона требует дальнейших исследований по изучению шумовой обстановки в разные периоды времени, подбора нелинейных свипов от вибратора, проведения полевых экспериментов по регистрации со специальными регистраторами для приёма вибросигналов и др.

В результате экспериментов по расширению апертуры режимных вибросейсмических наблюдений за счёт использования сейсмологических станций с хорошим прохождением сигналов от вибратора выбраны оптимальные точки регистрации на юге Алтая вблизи зон сейсмических

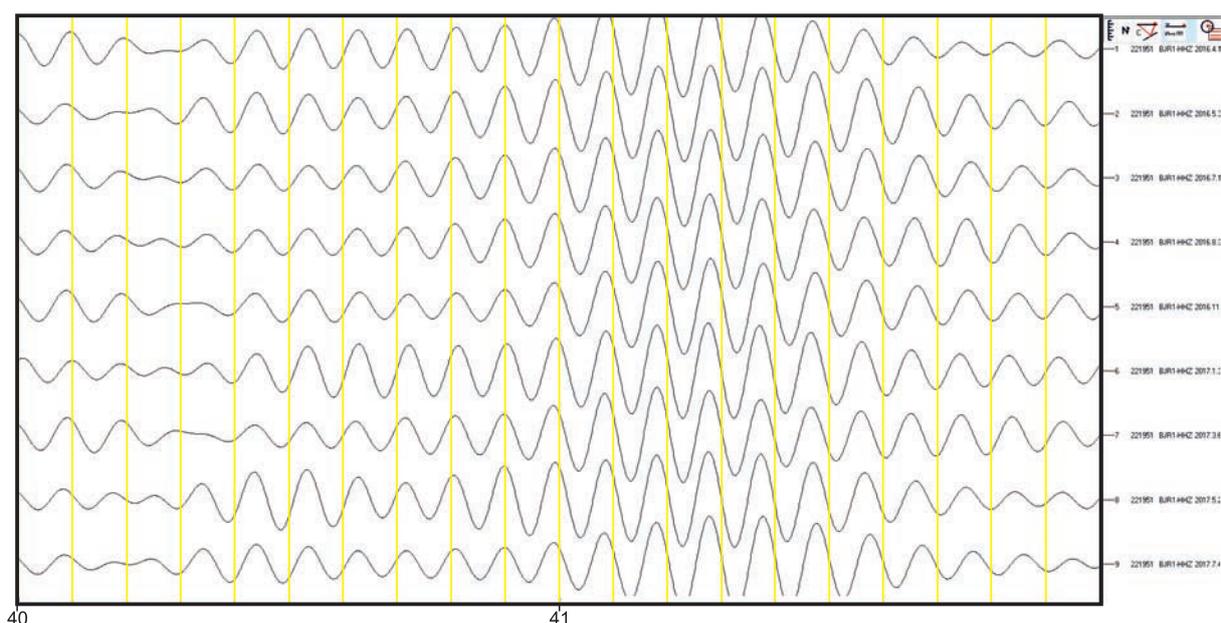


Рис. 28. Фрагменты ряда вибромониторинга в 2017 г. на сейсмостанции ВJR1

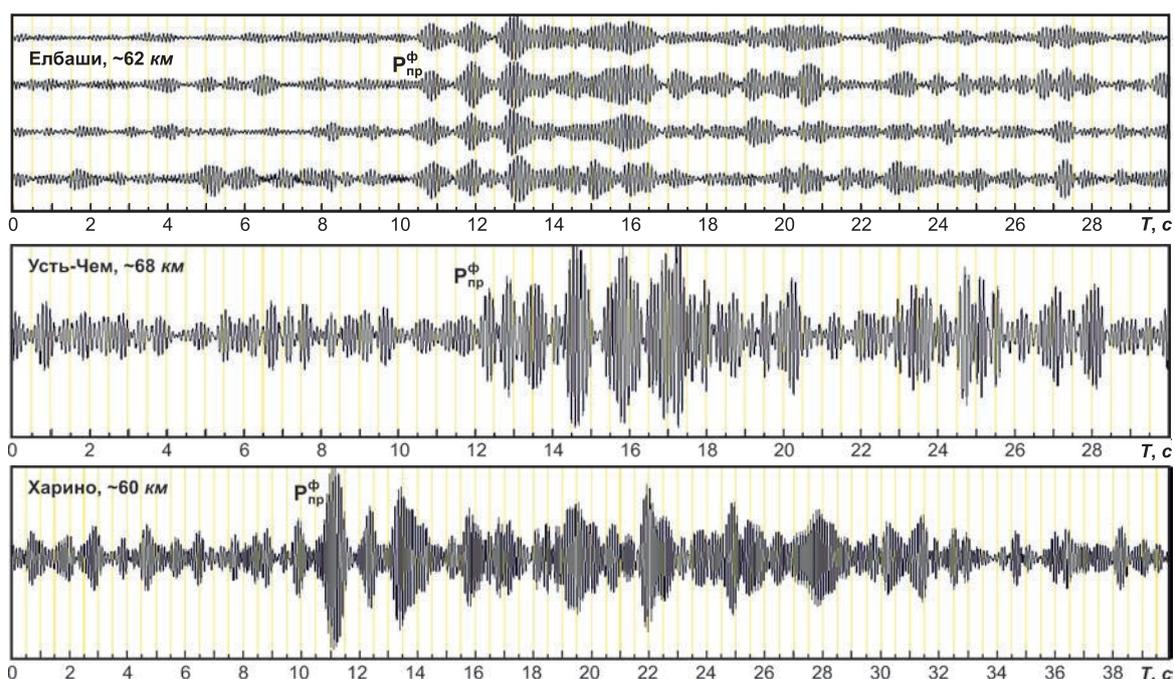


Рис. 29. Примеры коррелограмм в районе Кольванского разреза

активизаций и в районах техногенных активизаций в Кузбассе и под Новосибирском. Накопление рядов вибросейсмического мониторинга с вибратором ЦВ-40 на сети режимных станций позволит изучать вариации волновых полей разно поляризованных P - и S -волн, связанных с изменениями напряжённо-деформированного состояния среды в очаговых зонах готовящихся природных и техногенных землетрясений, что очень важно для прогноза развития сейсмических активизаций в непосредственной близости от крупных гражданских центров Алтае-Саянского региона.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Литература

Алексеев А.С., Глинский Б.М., Геза Н.И., Еманов А.Ф., Кашун В.Н., Ковалевский В.В., Маништейн А.К., Селезнев В.С., Сердюков С.В., Соловьев В.М., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Хайретдинов М.С., Чичинин И.С., Юшин В.И. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. — Новосибирск: Изд-во СО РАН «Гео», 2004. — 350 с.

Алексеев А.С., Глинский Б.М., Еманов А.Ф., Кашун В.Н., Ковалевский В.В., Маништейн А.К., Селезнев В.С., Сердю-

ков С.В., Соловьев В.М., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Хайретдинов М.С., Чичинин И.С., Юшин В.И. Новые геотехнологии и комплексные геофизические методы изучения внутренней структуры и динамики геосфер // Вибрационные геотехнологии. — М.: Мин-во промышленности, науки и технологий РФ, 2002. — 474 с.

Алексеев А.С., Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С., Чичинин И.С., Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Соловьев В.М. Методы решения прямых и обратных задач сейсмологии, электромагнетизма и экспериментальные исследования в проблемах изучения геодинамических процессов в коре и верхней мантии Земли. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. — 310 с.

Аржанникова А.В., Аржанников С.Г. Сеймотектонические исследования в Восточной Туве и землетрясения 27.12.2011 и 26.02.2012 гг. // Тувинские землетрясения 2011–2012 гг. — Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2014. — С. 10–25.

Гайский В.И., Жалковский Н.Д. Исследование повторяемости землетрясений Западной Тувы // Известия АН СССР. Физика Земли. — 1971б. — № 9. — С. 16–27.

Гайский В.И., Жалковский Н.Д. Микроземлетрясения Западной Тувы: энергетическая классификация и размеры очагов // Известия АН СССР. Физика Земли. — 1971а. — № 4. — С. 29–40.

Гайский В.И., Жалковский Н.Д. Распределение очагов землетрясений разной величины в пространстве и во времени // Известия АН СССР. Физика Земли. — 1972. — № 2. — С. 13–22.

Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон, катастрофических событий в горнотехнических и природных системах. Т. 1 / Отв. ред.

- Н.Н. Мельников. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. — 549 с.
- Гольдин С.В., Кучай О.А. Сейсмотектонические деформации Алтае-Саянской горной области и элементы коллизивно-блочной геодинамики // Геология и геофизика. — 2007. — Т. 48, № 7. — С. 692–723.
- Гольдин С.В., Кучай О.А. Сейсмотектонические деформации в окрестности сильных землетрясений Алтая // Физическая мезомеханика. — 2008. — Т. 11, № 1. — С. 3–13.
- Дергачев А.А. Построение детальных карт сейсмической активности Алтае-Саянской области по большим площадкам осреднения // Геология и геофизика. — 2008. — № 12. — С. 1274–1284.
- Дергачев А.А., Даницг Л.Г. О представительной регистрации и глубинах очагов землетрясений Алтае-Саянской области // Исследования по созданию научных основ прогноза землетрясений в Сибири: Оператив. информ. Вып. 3. — Иркутск: ИЗК СО АН СССР, 1989. — С. 34–37.
- Дергачев А.А., Филина А.Г. Детальные сейсмологические наблюдения в эпицентральной зоне Таштагольского землетрясения 05.02.1988 г. // Исследования по созданию научных основ прогноза землетрясений в Сибири: Оператив. информ. Вып. 4. — Иркутск: ИЗК СО АН СССР, 1990. — С. 37–42.
- Еманов А.А., Еманов А.Ф., Лескова Е.В., Фатеев А.В. Алтайский сейсмологический полигон // Землетрясения в России в 2014 году. — Обнинск: ГС РАН, 2016. — С. 94–99.
- Еманов А.А., Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Филина А.Г. Подходы к изучению пространственно-временных связей в сейсмичности Алтае-Саянской складчатой зоны // Проблемы региональной геофизики. Материалы геофизической конференции, посвящённой 70-летию со дня рождения С.В. Крылова. — Новосибирск: ООО «Типография Сибири», 2001. — С. 65–67.
- Еманов А.А., Лескова Е.В. Структурные особенности афтершокового процесса Чуйского (Горный Алтай) землетрясения // Геология и геофизика. — 2005. — Т. 46, № 10. — С. 1065–1072.
- Еманов А.А., Лескова Е.В., Еманов А.Ф., Фатеев А.В. Элементы структуры и фазы развития афтершокового процесса Чуйского землетрясения // Физическая мезомеханика. — 2009б. — Т. 12, № 1. — С. 29–36.
- Еманов А.А., Лескова Е.В., Еманов А.Ф., Фатеев А.В., Колесников Ю.И., Семин А.Ю., Янкайтис В.В. Наблюдения временными сетями. Эпицентральная зона Чуйского землетрясения 27.03.2003 г., $M_S=7.3$ (Алтай) // Землетрясения России в 2007 году. — Обнинск: ГС РАН, 2009а. — С. 82–85.
- Еманов А.А., Лескова Е.В., Еманов А.Ф., Фатеев А.В., Колесников Ю.И., Семин А.Ю., Рубцова А.В., Демидова А.А. Детальные сейсмологические исследования эпицентральной зоны Чуйского землетрясения 27.03.2003г., $M_S=7.3$ (Алтай) и района будущего водохранилища Чибитской ГЭС // Землетрясения России в 2008 году. — Обнинск: ГС РАН, 2010. — С. 97–101.
- Еманов А.Ф., Ворона У.Ю., Смоглюк А.С., Еманов А.А., Лескова Е.В. Микросейсмичность района г. Камень-на-Оби, Алтайский край // Землетрясения России в 2010 году. — Обнинск: ГС РАН, 2012б. — С. 96–99.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В. Сейсмические активизации в Белино-Бусингольской зоне // Физическая мезомеханика. — 2010. — Т. 13, № 1. — С. 72–77.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В. Тектоническая интерпретация сейсмических процессов Тувы по фоновой сейсмичности и по афтершоковым процессам крупнейших землетрясений // Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы IV Всероссийской конференции с международным участием / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. — М.: ГЕОС, 2017б. — С. 90–98.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Колесников Ю.А., Фатеев А.В., Семин А.Ю. Сейсмический мониторинг Алтае-Саянской горной области Алтае-Саянским филиалом ГС РАН // Землетрясения России в 2005 году. — Обнинск: ГС РАН, 2007а. — С. 53–60.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Колесников Ю.А., Фатеев А.В., Семин А.Ю. Сейсмический мониторинг района г. Осинники (Кемеровская область) // Землетрясения России в 2005 году. — Обнинск: ГС РАН, 2007б. — С. 63–65.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Фатеев А.В., Филина А.Г. Чуйское землетрясение 27 сентября 2003 года с $M_w=7.3$, $K_p=17$ (Горный Алтай) // Землетрясения Северной Евразии. — Обнинск: ГС РАН, 2009а. — С. 326–343.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Янкайтис В.В., Филина А.Г. Урег-Нурское землетрясение 15.05.1970 г., $M_S=7.0$ (Монгольский Алтай), афтершоковый процесс и особенности современной сейсмичности эпицентральной области // Геология и геофизика. — 2012а. — Т. 53, № 10. — С. 1417–1429.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Селезнев В.С., Фатеев А.В. Тувинские землетрясения 27.12.2011 г., $M_L=6.7$ и 26.02.2012 г., $M_L=6.8$ и их афтершоки // Доклады Академии наук. — 2014а. — Т. 456, № 2. — С. 223–226. doi: 10.7868/S0869565214140187
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В. Об изменении сейсмического режима в Чуйско-Курайской зоне Горного Алтая в 1963–2016 гг. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. — 2017а. — Т. 2, № 3. — С. 41–45.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В., Подкорытова В.Г. Тувинские землетрясения 27.12.2011 ($M_L=6.7$) и 26.02.2012 ($M_L=6.8$), геомеханическая модель развития взаимосвязанной активизации // Геофизические методы исследования земной коры: Материалы Всероссийской конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева. — Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2014б. — С. 138–141.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В., Семин А.Ю. Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе // Физическая мезомеханика. — 2009б. — Т. 12, № 1. — С. 37–43.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Павленко О.В., Фатеев А.В., Куприш О.В., Подкорытова В.Г. Кольванское землетрясение 09.01.2019 г. с $M_L=4.3$ и особенности наведённой сейсмичности в условиях Горловского угольного

- бассейна // Вопросы инженерной сейсмологии. — 2019. — Т. 46, № 4. — С. 29–45. doi: 10.21455/VIS2019.4-2
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В. Бачатское тектоническое землетрясение 18 июня 2013 г. с $M_L=6.1$, $I_0=7$ (Кузбасс) // Российский сейсмологический журнал. — 2020. — Т. 2, № 1. — С. 48–61. doi: 10.35540/2686-7907.2020.1.05
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В. Сейсмотектоника активизированной объёмной структуры разломов: результаты исследования строения верхнекоревой очаговой области континентального Чуйского землетрясения $M_s=7.3$, произошедшего 27 сентября 2003 г. в Горном Алтае (Россия) // Геотектоника. — 2021. — № 2. — С. 94–104. doi: 10.31857/S0016853X21010045
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Кунгурцев Л.В., Лескова Е.В., Шейкина Ж.В., Ярыгина М.А. Пространственно-временной анализ сейсмичности Алтае-Саянской складчатой зоны // Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия: Материалы Международной конференции. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003б. — С. 73–86.
- 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.
- 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. 33–43.
- Еманов А.Ф., Колесников Ю.И., Еманов А.А., Филина А.Г., Подкорытова В.Г., Фатеев А.В., Ярыгина М.А. Изучение землетрясений малых энергий на локальной сети Алтайского сейсмологического полигона // Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность литосферы: Труды Всероссийского совещания. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2003а. — С. 324–326.
- Еманов А.Ф., Лескова Е.В., Еманов А.А., Радзиминович Я.Б., Гилева Н.А., Артемова А.И. Белин-Бий-Хемское землетрясение 16 августа 2008 г. с $K_p=15$, $M_w=5.7$, $I_0=7$ (Республика Тыва) // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. — Обнинск: ГС РАН, 2014в. — С. 378–385.
- Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Чичинин И.С., Капцов О.В., Кашун В.Н., Жемчугова И.В., Дучков А.Д. Исследование динамических особенностей сезонных изменений волновых полей при вибр Сейсмическом мониторинге среды // Геология и геофизика. — 1999. — Т. 40, № 3. — С. 474–486.
- Жалковский Н.Д. Закон повторяемости землетрясений и некоторые его следствия. — Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1988. — 29 с.
- Жалковский Н.Д. Закон повторяемости землетрясений и проблемы предвестников // Геология и геофизика. — 1989а. — № 9. — С. 93–99.
- Жалковский Н.Д. Некоторые результаты исследований сейсмичности Алтае-Саянской горной области // Региональные геофизические исследования в Сибири. — Новосибирск: Наука, 1967. — С. 170–183.
- Жалковский Н.Д. О величине и повторяемости наиболее сильных землетрясений // Геология и геофизика. — 1989б. — № 9. — С. 99–105.
- Жалковский Н.Д. О подобии сейсмического процесса на микро- и макроуровнях // Геология и геофизика. — 1989в. — № 11. — С. 113–117.
- Жалковский Н.Д., Кучай О.А., Мучная В.И. Сейсмичность и некоторые характеристики напряжённого состояния земной коры Алтае-Саянской области // Геология и геофизика. — 1995. — Т. 36, № 10. — С. 20–30.
- Жалковский Н.Д., Моисеенко Ф.С. Землетрясения в Западной Сибири // Природа. — 1966. — № 3. — С. 82–86.
- Жалковский Н.Д., Мучная В.И. О точности определения наклона графика повторяемости землетрясений // Геология и геофизика. — 1987. — № 10. — С. 121–129.
- Жалковский Н.Д., Цибульчик Г.М., Цибульчик И.Д. Каменское землетрясение 15 февраля 1965 года // Геология и геофизика. — 1965. — № 2. — С. 116–125.
- Зятыкова Л.К. Структурная геоморфология Алтае-Саянской горной области. — Новосибирск: Наука, 1977. — 215 с.
- 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.
- Масарский С.И., Рейснер Г.И. Новейшие тектонические движения и сейсмичность Западного Саяна и Западной Тувы. — М.: Наука, 1971. — 154 с.
- Молнар П., Курушин Р.А., Баясгалан А., Хаднат К.В. Дислокации Гоби-Алтайского (Монголия) землетрясения 1957 г. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. — 148 с.
- Молнар П., Курушин Р.А., Кочетков В.М., Демьянович М.Г., Борисов В.А., Ващиллов Ю.Я. Деформация и разрывообразование при сильных землетрясениях в Монголо-Сибирском регионе // Глубинное строение и геодинамика Монголо-Сибирского региона. — Новосибирск: Наука, 1995. — С. 5–55.
- Новиков И.С. Морфотектоника Алтая. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал «Гео», 2004. — 312 с.
- Овсюченко А.Н., Рогожин Е.А., Мараханов А.В., Ларьков А.С., Новиков С.С., Кузугет К.С., Бутанаев Ю.В. Геологические исследования Тувинских землетрясений 2011–2012 гг. // Вопросы инженерной сейсмологии. — 2016. — Т. 43, № 1. — С. 5–28.
- Павленов В.А., Чельницкий В.В., Черных Е.Н., Сембаламут В.М., Рыбушкин А.Ю. Инженерно-сейсмологический мониторинг сейсмометрических данных на территории Прибайкалья // Сейсмология в Сибири на рубеже тысячелетий. Материалы Международной геофизической конференции. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. — С. 179–181.
- Парфеевец А.В., Саньков В.А. Напряжённое состояние земной коры и геодинамика юго-западной части Байкальской рифтовой системы. — Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2006. — 151 с.
- Растворова В.А., Цибульчик И.Д. Урэг-Нурское землетрясение 15.V.1970 г. в Северо-Западной Монголии // Вопросы инженерной сейсмологии. — 1984. — Вып. 25. — С. 120–124.

Рогожин Е.А. Тектоника очаговых зон сильных землетрясений Северной Евразии конца XX столетия // Российский журнал наук о Земле. – 2000. – Т. 2, № 1. – URL: <http://elpub.wdcb.ru/journals/rjes/rus>

Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Ушанова Е.А. Тектоническая позиция и геологические проявления Алтайского землетрясения // Геотектоника. – 2007. – № 2. – С. 3–22.

Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Соловьев В.М., Сальников А.С., Юшин В.И., Кашун В.Н., Елагин С.А., Галева Н.А. Активная сейсмология и ГСЗ с мощными вибраторами в Сибири // Труды Международной конференции «Вычислительная математика и математическая геофизика», посвящённой 90-летию со дня рождения академика А.С. Алексева. – Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2018. – С. 349–356.

Семибаламут В.М., Рыбушкин А.Ю. Комплекс автономных регистраторов сейсмических сигналов высокого разрешения // Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия. Материалы международной геофизической конференции (Новосибирск, 15–19 сентября 2003 г.) – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – С. 120–128.

Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования / Отв. ред. М.Д. Новопашин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 449 с.

Соловьев В.М., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Кашун В.Н., Жемчугова И.В. Активный вибросейсмический мониторинг в северо-западной части Алтае-Саянской складчатой области // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли: Материалы 2-го Международного симпозиума. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – С. 64–70.

Солоненко В.П., Тресков А.А., Флоренсов Н.А. Катастрофическое Гоби-Алтайское землетрясение 4 декабря 1957 г. – М.: Госгеолтехиздат, 1960. – 48 с.

Хилько С.Д., Курушин Р.А., Кочетков В.М., Мишарина Л.А., Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Ласточкин С.В., Балжинням И., Монхоо Д. Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии // Труды Совместной советско-монгольской научно-исследовательской геологической экспедиции. Вып. 41. – М.: Наука, 1985. – 224 с.

Цибульчик Г.М., Жалковский Н.Д., Моисеенко Ф.С. Результаты сейсмических исследований в Алтае-Саянской горной области // Вопросы сейсмичности Сибири. Труды Института земной коры. Вып. 18 / Отв. ред. А.А. Тресков. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1964. – С. 204–213.

Чичинин И.С., Юшин В.И. Вибробратия. Воспоминания геофизиков. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. – 108 с.

Сведения об авторах

Еманов Александр Федорович, д-р техн. наук, директор Алтае-Саянского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (АСФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Новосибирск, Россия. E-mail: emanov@gs.nsc.ru

Еманов Алексей Александрович, канд. геол.-мин. наук, зам. директора АСФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск; ст. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), г. Новосибирск, Россия. E-mail: alex@gs.nsc.ru

Фатеев Александр Владимирович, ст. науч. сотр. АСФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия; вед. инженер ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск. E-mail: fateev@gs.nsc.ru

Соловьев Виктор Михайлович, канд. геол.-мин. наук., зам. директора АСФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: solov@gs.nsc.ru

Шевкунова Елена Викторовна, науч. сотр. АСФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: elenash@gs.nsc.ru

Гладышев Егор Андреевич, мл. науч. сотр. АСФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: gladyshev@gs.nsc.ru

Антонов Илья Александрович, нач. сектора АСФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: antonov@gs.nsc.ru

Корабельщиков Дмитрий Геннадьевич, гл. инженер АСФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: korabel@gs.nsc.ru

Подкорытова Валентина Григорьевна, науч. сотр. АСФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: podk@gs.nsc.ru

Янкайтис Виктор Викторович, нач. отд. АСФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: viktor@gs.nsc.ru

Елагин Семён Александрович, науч. сотр. АСФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: maelstrom2006@gmail.com

Сережников Николай Александрович, науч. сотр. АСФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: serezhnikov@gs.nsc.ru

Дураченко Алексей Валерьевич, науч. сотр. АСФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: durachenko@gs.nsc.ru

Артемова Анна Игоревна, науч. сотр. АСФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: artemova@gs.nsc.ru

Seismological studies in the Altai–Sayan mountain region

© 2021 A.F. Emanov¹, A.A. Emanov^{1,2}, A.V. Fateev^{1,2}, V.M. Soloviev¹,
E.V. Shevkunova¹, E.A. Gladyshev¹, I.A. Antonov¹, D.G. Korabelshchikov¹,
V.G. Podkorytova¹, V.V. Yankaitis¹, S.A. Elagin¹, N.A. Serezhnikov¹,
A.V. Durachenko¹, A.I. Artemova¹

¹ASD GS RAS, Novosibirsk, Russia; ²IPGG SB RAS, Novosibirsk, Russia

Received February 17, 2021

Abstract The paper provides a brief overview of seismological studies in the Altai–Sayan mountain region. The development of a network of seismological stations and experiments with temporary stations in the epicentral zones of large earthquakes is described. It is shown that the background seismicity of the region is ordered over time into structures with a hierarchy in the rate of occurrence. Large earthquakes in some cases occur in places that do not match with the areas of increased background seismicity. Major earthquakes in Eastern Tuva (Busingol, Belin-Biy-Khem, etc.) occur as shifts and rotations of blocks near rift depressions. Large earthquakes of the Western Sayan Ridge and the Academician Obruchev Ridge (Tuvan First and Second earthquakes, Sayan earthquake) are associated with faults transverse to these structures and are the result of the uneven extension of blocks of the Tuva hollow and the Tuva highlands to the north. Studies in the Altai Mountains found that after a long period (about 10 years) of the aftershock process of the Chui earthquake dominating the seismicity, a period of seismic activation of adjacent (60–80 km) and distant (within a radius of approximately 260–280 km) structures occurred. The center of seismic activity shifted from the epicenter of the 2003 Chui earthquake to the epicenter of the 2019 Aigulak earthquake. Experimental work with powerful vibrators has determined the capabilities of a network of seismological stations in vibroseismic monitoring of the Earth’s crust.

Keywords Seismology, earthquakes, seismic networks, Altai–Sayan mountain region.

For citation Emanov, A.F., Emanov, A.A., Fateev, A.V., Soloviev, V.M., Shevkunova, E.V., Gladyshev, E.A., Antonov, I.A., Korabelshchikov, D.G., Podkorytova, V.G., Yankaitis, V.V., Elagin, S.A., Serezhnikov, N.A., Durachenko, A.V., & Artemova, A.I. (2021). [Seismological studies in the Altai–Sayan mountain region]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 3(2), 20–51. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.2.02>

References

- Alekseev, A.S., Glinsky, B.M., Emanov, A.F., Kashun, V.N., Kovalevsky, V.V., Manstein, A.K., Seleznev, V.S., Serdyukov, S.V., Soloviev, V.M., Sobisevich, A.L., Sobisevich, L.E., Khairtdinov, M.S., Chichinin, I.S., & Yushin, V.I. (2002). [New geotechnologies and complex geophysical methods for studying the internal structure and dynamics of geospheres]. In *Vibratsionnye geotekhnologii* [Vibration geotechnology]. Moscow, Russia: Ministry of Industry, Science and Technology RF Publ., 474 p. (In Russ.).
- Alekseev, A.S., Glinsky, B.M., Geza, N.I., Emanov, A.F., Kashun, V.N., Kovalevsky, V.V., Manstein, A.K., Seleznev, V.S., Serdyukov, S.V., Soloviev, V.M., Sobisevich, A.L., Sobisevich, L.E., Khairtdinov, M.S., Chichinin, I.S., & Yushin, V.I. (2004). *Aktivnaia seismologiya s moshchnymi vibratsionnymi istochnikami* [Active seismology with powerful vibration sources]. Novosibirsk, Russia: Publ. House SB RAS, Branch “Geo”, 350 p. (In Russ.).
- Alekseev, A.S., Glinsky, B.M., Kovalevsky, V.V., Khairtdinov, M.S., Chichinin, I.S., Emanov, A.F., Seleznev, V.S., & Soloviev, V.M. (2010). *Metody resheniia priamykh*

- i obratnykh zadach seismologii, elektromagnetizma i eksperimental’nye issledovaniia v problemakh izuchenii geodinamicheskikh protsessov v kore i verkhnei mantii Zemli* [Methods for solving direct and inverse problems of seismology, electromagnetism and experimental research in the problems of studying geodynamic processes in the crust and upper mantle of the Earth]. – Novosibirsk, Russia: Publ. House SB RAS, 310 p. (In Russ.).
- Arzhannikova, A.V., & Arzhannikov, S.G. (2014). [Seismotectonic studies in Eastern Tuva and earthquakes on December 27, 2011 and February 26, 2012]. In *Tuvinskii zemletriaseniia 2011–2012 gg.* [Tuva earthquakes of 2011–2012] (pp. 10–25). Kyzyl, Russia: TIKOPR SB RAS Publ. (In Russ.).
- Chichinin, I.S., & Yushin, V.I. (2018). *Vibrobratiia. Vospominaniia geofizikov* [Vibrocracy. Memories of geophysicists]. Novosibirsk, Russia: Publ. House SB RAS, 108 p. (In Russ.).
- Dergachev, A.A. (2008). Detailed seismicity mapping of the Altai–Sayan zone using large averaging areas. *Russian geology and geophysics*, 49(12), 963–970. doi: 10.1016/j.rgg.2008.01.012

- Dergachev, A.A., & Dantsig, L.G. (1989). [On the representative registration and depths of earthquake foci in the Altai-Sayan region]. In *Issledovaniia po sozdaniiu nauchnykh osnov prognoza zemletriasenii v Sibiri: Operativ. inform. Vyp. 3* [Research on the creation of a scientific basis for predicting earthquakes in Siberia: Operative. inform. Is. 3] (pp. 34–37). Irkutsk, Russia: IZK SB AS USSR Publ. (In Russ.).
- Dergachev, A.A., & Filina, A.G. (1990). [Detailed seismological observations in the epicentral zone of the Tashtagol earthquake of 05.02.1988]. In *Issledovaniia po sozdaniiu nauchnykh osnov prognoza zemletriasenii v Sibiri: Operativ. inform. Vyp. 4* [Research on the creation of a scientific basis for predicting earthquakes in Siberia: Operative. inform. Is. 4] (pp. 37–42). Irkutsk, Russia: IZK SB AS USSR Publ. (In Russ.).
- Emanov, A.A., & Leskova, E.V. (2005). Structure of the aftershock process of the Chuya Earthquake (Gorny Altai). *Russian geology and geophysics*, 46(10), 1071–1080.
- Emanov, A.A., Emanov, A.F., Leskova, E.V., & Fateev, A.V. (2016). [Altai seismological test site]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2014 godu* [The earthquakes of Russia in 2014] (pp. 94–99). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Emanov, A.A., Emanov, A.F., Seleznev, V.S., & Filina, A.G. (2001). [Approaches to the study of spatio-temporal relationships in the seismicity of the Altai-Sayan fold zone]. In *Problemy regional'noi geofiziki. Materialy geofizicheskoi konferentsii, posviashchennoi 70-letiiu so dnia rozhdeniia S.V. Krylova* [Regional geophysics problems. Materials of the geophysical conference dedicated to the 70th birthday of S.V. Krylova] (pp. 65–67). Novosibirsk, Russia: LLC "Typography of Siberia" Publ. (In Russ.).
- Emanov, A.A., Leskova, E.V., Emanov, A.F., & Fateev, A.V. (2009b). [Elements of the structure and development phases of the aftershock process of the Chuya earthquake]. In *Fizicheskaiia mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 12(1), 29–36. (In Russ.).
- Emanov, A.A., Leskova, E.V., Emanov, A.F., Fateev, A.V., Kolesnikov, Yu.I., Semin, A.Yu., & Yankaitis, V.V. (2009a). [Observations with temporary networks. Epicentral zone of the Chuya earthquake of March 27, 2003, $M_s=7.3$ (Altai)]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2007 godu* [The earthquakes of Russia in 2007] (pp. 82–85). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Emanov, A.A., Leskova, E.V., Emanov, A.F., Fateev, A.V., Kolesnikov, Yu.I., Semin, A.Yu., Rubtsova, A.V., & Demidova, A.A. (2010). [Detailed seismological studies of the epicentral zone of the Chuya earthquake of March 27, 2003, $M_s=7.3$ (Altai) and the area of the future reservoir of the Chibitskaya HPP]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2008 godu* [The earthquakes of Russia in 2008] (pp. 97–101). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., & Fateev, A.V. (2020). [Bachatsky induced earthquake on June 18, 2013, $M_L=6.1$, $I_0=7$ (Kuzbass)]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(1), 48–61. (In Russ.). doi: 10.35540/2686-7907.2020.1.05
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., & Fateev, A.V. (2021). [Seismotectonic features of the spatial volumetric structure of faults activated with Chuy Earthquake $M_s=7.3$ occurred on September 27, 2003 in Mountain Altai (Russia): results of the study of the upper-crustal focal area]. *Geotektonika* [Geotectonics], 2, 94–104. (In Russ.).
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., & Leskova, E.V. (2010). [Seismic activations in the Belino-Busingolskaya zone]. In *Fizicheskaiia mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 13(1), 72–77. (In Russ.).
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., & Leskova, E.V. (2017b). [Tectonic interpretation of seismic processes in Tuva by background seismicity and aftershock processes of the largest earthquakes]. In *Triggnerye efekty v geosistemakh. Materialy IV Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (red. V.V. Adushkin, G.G. Kocharian)* [Trigger effects in geosystems. Proceedings of the IV All-Russian Conference with International Participation (V.V. Adushkin, G.G. Kocharyan Eds.)] (pp. 90–98). Moscow, Russia: GEOS Publ. (In Russ.).
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Filina, A.G., & Leskova, E.V. (2005). [Spatial and temporal features of the seismicity of the Altai-Sayan fold zone]. In *Fizicheskaiia mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 8(1), 49–64. (In Russ.).
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Filina, A.G., Kungurtsev, L.V., Leskova, E.V., Sheikina, Zh.V., & Yarygina, M.A. (2003b). [Spatio-temporal analysis of the seismicity of the Altai-Sayan fold zone]. In *Problemy seismologii III-go tysyacheletii: Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii* [Problems of seismology of the 3rd millennium: Proceedings of the International Conference] (pp. 73–86). Novosibirsk, Russia: Publ. House SB RAS. (In Russ.).
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Filina, A.G., Leskova, E.V., Kolesnikov, Yu.I., & Rudakov, A.D. (2006). [General and individual in the development of aftershock processes of the largest earthquakes in the Altai-Sayan mountain region]. In *Fizicheskaiia mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 9(1), 33–43. (In Russ.).
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Leskova, E.V., & Fateev, A.V. (2017a). [On the change in the seismic regime in the Chuya-Kurai zone of Gorny Altai in 1963–2016]. *Interespo GEO-Sibir'* [Interexpo GEO-Siberia], 2(3), 41–45. (In Russ.).
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Leskova, E.V., Fateev, A.V., & Podkorytova, V.G. (2014b). [Tuvan earthquakes on December 27, 2011 ($M_L=6.7$) & 26.02.2012 ($M_L=6.8$), geomechanical development model of interconnected activation]. In *Geofizicheskie metody issledovaniia zemnoi kory: Materialy Vserossiiskoi konferentsii, posviashchennoi 100-letiiu so dnia rozhdeniia akademika N.N. Puzyreva* [Geophysical methods for studying the earth's crust: Proceedings of the All-Russian conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of academician N.N. Puzyrev] (pp. 138–141). Novosibirsk, Russia: Publ. House INGG SB RAS. (In Russ.).
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Leskova, E.V., Fateev, A.V., & Semin, A.Yu. (2009b). [Seismic activations in coal development in Kuzbass]. In *Fizicheskaiia mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 12(1), 49–64. (In Russ.).
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Leskova, E.V., Kolesnikov, Yu.A., Fateev, A.V., & Semin, A.Yu. (2007a). [Seismic monitoring

- of the Altai-Sayan mountainous region of the Altai-Sayan Division of the GS RAS]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2005 godu* [The earthquakes of Russia in 2005] (pp. 53-60). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Leskova, E.V., Kolesnikov, Yu.A., Fateev, A.V., & Semin, A.Yu. (2007b). [Seismic monitoring of the area of Osinniki (Kemerovo region)]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2005 godu* [The earthquakes of Russia in 2005] (pp. 63-65). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Leskova, E.V., Kolesnikov, Yu.I., Fateev, A.V., & Filina, A.G. (2009a). [Chuya earthquake on September 27, 2003 with $M_w=7.3$, $K_R=17$ (Mountain Altai)]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes of the Northern Eurasia] (pp. 326-343). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Leskova, E.V., Kolesnikov, Yu.I., Yankaitis, V.V., & Filina, A.G. (2012a). The MS=7.0 Uureg Nuur Earthquake of 15.05.1970 (Mongolian Altai): The aftershock process and current seismicity in the epicentral area. *Russian geology and geophysics*, 53(10), 1090-1099. doi: 10.1016/j.rgg.2012.08.009
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Leskova, E.V., Seleznev, V.S., & Fateev, A.V. (2014a). The Tuva earthquakes of December 27, 2011, $M_L=6.7$, and February 26, 2012, $M_L=6.8$, and their aftershocks. *Doklady Earth Sciences*, 456(1), 594-597. doi: 10.1134/S1028334X14050249
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Pavlenko, O.V., Fateev, A.V., Kuprish, O.V., & Podkorytova, V.G. (2020). Kolyvan Earthquake of January 9, 2019, with $M_L=4.3$ and induced seismicity features of the Gorlovsky Coal Basin. *Seismic instruments*, 56(3), 254-268. doi: 10.3103/S0747923920030020
- Emanov, A.F., Kolesnikov, Yu.I., Emanov, A.A., Filina, A.G., Podkorytova, V.G., Fateev, A.V., & Yarygina, M.A. (2003a). [Study of low-energy earthquakes on the local network of the Altai seismological test site]. In *Napriazhenno-deformirovannoe sostoianie i seismichnost' litosfery: Trudy Vserossiiskogo soveshchaniia* [Stress-strain state and seismicity of the lithosphere: Proceedings of the All-Russian meeting] (pp. 324-326). Novosibirsk, Russia: Publ. House SB RAS, Branch "Geo". (In Russ.).
- Emanov, A.F., Leskova, E.V., Emanov, A.A., Radziminovich, Ya.B., Gileva, N.A., & Artemova, A.I. (2014c). [Belin-Biy-Khem earthquake on August 16, 2008 with $K_R=15$, $M_w=5.7$, $I_0=7$ (Tyva Republic)]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii, 2008 god* [Earthquakes of the Northern Eurasia, 2008] (pp. 378-385). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Emanov, A.F., Seleznev, V.S., Soloviev, V.M., Chichinin, I.S., Kaptsov, O.V., Kashun, V.N., Zhemchugova, I.V., & Duchkov, A.D. (1999). Investigation of dynamic peculiarities of seasonal variations of wave fields on vibroseismic monitoring of a medium. *Russian geology and geophysics*, 40(4), 474-486.
- Emanov, A.F., Vorona, U.Yu., Smoglyuk, A.S., Emanov, A.A., & Leskova, E.V. (2012b). [Microseismicity of the area of Kamen-na-Obi, Altai Territory]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2010 godu* [The earthquakes of Russia in 2010] (pp. 96-99). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Gaiskiy, V.I., & Zhalkovskiy, N.D. (1971a). Microearthquakes in Western Tuva: Energy Classification and Focal Sizes. *Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Solid Earth*, 4, 29-40.
- Gaiskiy, V.I., & Zhalkovskiy, N.D. (1971b). Investigation of the periodicity of earthquakes in Western Tuva. *Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Solid Earth*, 9, 16-27.
- Gaiskiy, V.I., & Zhalkovskiy, N.D. (1972). Distribution of earthquake foci of different sizes in space and time. *Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Solid Earth*, 2, 13-22.
- Gol'din, S.V., & Kuchai, O.A. (2007). Seismic strain in the Altai-Sayan active seismic area and elements of collisional geodynamics. *Russian geology and geophysics*, 48(7), 536-557. doi: 10.1016/j.rgg.2007.06.005
- Gol'din, S.V., & Kuchai, O.A. (2008). [Seismotectonic deformations in the vicinity of strong earthquakes in Altai]. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 11(1), 3-13. (In Russ.).
- Khilko, S.D., Kurushin, R.A., Kochetkov, V.M., Misharina, L.A., Melnikova, V.I., Gileva, N.A., Lastochkin, S.V., Balzhiniam, I., & Monhoo, D. (1985). [Earthquakes and Fundamentals of Seismic Zoning in Mongolia]. In *Trudy Sovmestnoi sovetsko-mongol'skoi nauchno-issledovatel'skoi geologicheskoi ekspeditsii. Vyp. 41* [Proceedings of the Joint Soviet-Mongolian scientific research geological expedition. Is. 41]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 224 p. (In Russ.).
- Lunina, O.V., Gladkov, A.S., Novikov, I.S., Agatova, A.R., Vysotsky, E.M., & Emanov, A.A. (2006). Seismotectonic deformations and stress fields in the fault zone of the 2003 Chuya Earthquake, $M_s=7.5$, Gorny Altai. *Geotectonics*, 40(3), 208-224. doi: 10.1134/S0016852106030058
- Masarskiy, S.I., & Reisner, G.I. (1971). *Noveishie tektonicheskie dvizheniia i seismichnost' Zapadnogo Saiana i Zapadnoi Tuvy* [Newest tectonic movements and seismicity of the Western Sayan and Western Tuva]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 154 p. (In Russ.).
- Melnikov, N.N. (Ed.). (2018). *Geomekhanicheskie polia i protsessy: eksperimental'no-analiticheskie issledovaniia formirovaniia i razvitiia ochagovykh zon, katastroficheskikh sobytii v gornotekhnicheskikh i prirodnykh sistemakh. T. 1* [Geomechanical fields and processes: experimental and analytical studies of the formation and development of focal zones, catastrophic events in mining and natural systems. V. 1]. Novosibirsk, Russia: Publ. House SB RAS, 549 p. (In Russ.).
- Molnar, P., Kurushin, R.A., Bayasgalan, A., & Khadnat, K.V. (1998). *Dislokatsii Gobi-Altayskogo (Mongoliia) zemletriaseniia 1957 g.* [Dislocations of the Gobi-Altai (Mongolia) earthquake of 1957]. Novosibirsk, Russia: Publ. House SB RAS, 148 p. (In Russ.).
- Molnar, P., Kurushin, R.A., Kochetkov, V.M., Demyanovich, M.G., Borisov, V.A., & Vashchilov, Yu.Ya. (1995). [Deformation and rupture during strong earthquakes in the Mongol-Siberian region]. In *Glubinnoe stroenie*

- i geodinamika Mongolo-Sibirskogo regiona* [Deep structure and geodynamics of the Mongol-Siberian region] (pp. 5-55). Novosibirsk, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Novikov, I.S. (2004). *Morfotektonika Altaia* [Morphotectonics of Altai]. Novosibirsk, Russia: Publ. House SB RAS, Branch "Geo", 312 p. (In Russ.).
- Novopashin, M.D. (Ed.). (2008). *Sovremennaiia geodinamika massiva gornyykh porod verkhnei chasti litosfery: istoki, parametry, vozdeistvie na ob"ekty nedropol'zovaniia* [Modern geodynamics of the rock mass in the upper part of the lithosphere: origins, parameters, impact on subsoil use objects]. Novosibirsk, Russia: Publ. House SB RAS, 449 p. (In Russ.).
- Ovsyuchenko, A.N., Rogozhin, E.A., Marakhanov, A.V., Larkov, A.S., Novikov, S.S., Kuzhuget, K.S., & Butanaev, Yu.V. (2016). [Geological research of the Tuva earthquakes of 2011-2012]. *Voprosy inzhenernoi seismologii* [Problems of Engineering Seismology], 43(1), 5-28. (In Russ.).
- Parfeevets, A.V., & Sankov, V.A. (2006). *Napriazhennoe sostoiianie zemnoi kory i geodinamika iugo-zapadnoi chasti Baikalskoi riftovoi sistemy* [Stressed state of the earth's crust and geodynamics of the southwestern part of the Baikal rift system]. Novosibirsk, Russia: Academic Publ. House "Geo", 151 p. (In Russ.).
- Pavlenov, V.A., Chechel'nitsky, V.V., Chernykh, E.N., Semibalamut, V.M., & Rybushkin, A.Yu. (2000). [Engineering and seismological monitoring of seismometric data on the territory of the Baikal region]. In *Seismologiya v Sibiri na rubezhe tysiacheletii. Materialy Mezhdunarodnoi geofizicheskoi konferentsii* [Seismology in Siberia at the turn of the millennium. Materials of the International Geophysical Conference] (pp. 179-181). Novosibirsk, Russia: Publ. House SB RAS. (In Russ.).
- Rastvorova, V.A., & Tsibulchik, I.D. (1984). [Ureg-Nur Earthquake on May 15, 1970 in North-West Mongolia]. *Voprosy inzhenernoi seismologii* [Problems of Engineering Seismology], 25, 120-124. (In Russ.).
- Rogozhin, E.A. (2000). [The tectonics of source zones of North Eurasia-strong earthquakes of the end of the XX century]. *Rossiiskii zhurnal nauk o Zemle* [Russian Journal of Earth Sciences], 2(1), 37-62. Available at: <http://elpub.wdcb.ru/journals/rjes/> (In Russ.).
- Rogozhin, E.A., Ovsyuchenko, A.N., Marakhanov, A.V., & Ushanova, E.A. (2007). Tectonic setting and geological manifestations of the 2003 Altai Earthquake. *Geotectonics*, 41(2), 87-104. doi: 10.1134/S001685210702001X
- Seleznev, V.S., Emanov, A.F., Soloviev, V.M., Salnikov, A.S., Yushin, V.I., Kashun, V.N., Elagin, S.A., & Galeva, N.A. (2018). [Active seismology and GSZ with powerful vibrators in Siberia]. In *Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii «Vychislitel'naia matematika i matematicheskaiia geofizika», posviashchennoi 90-letiiu so dnia rozhdeniia akademika A.S. Alekseeva* [Proceedings of the International Conference "Computational Mathematics and Mathematical Geophysics" dedicated to the 90th anniversary of the birth of Academician A.S. Alekseev] (pp. 349-356). Novosibirsk, Russia: ICMiMG SB RAS Publ. (In Russ.).
- Semibalamut, V.M., & Rybushkin, A.Yu. (2003). [Complex of autonomous recorders of high-resolution seismic signals]. In *Problemy seismologii III-go tysiacheletia: Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii* [Problems of seismology of the 3rd millennium: Proceedings of the International Conference] (pp. 120-128). Novosibirsk, Russia: Publ. House SB RAS. (In Russ.).
- Solonenko, V.P., Treskov, A.A., & Florensov, N.A. (1960). *Katastroficheskoe Gobi-Altaiiskoe zemletriasenie 4 dekabria 1957 g.* [Catastrophic Gobi-Altai earthquake on December 4, 1957]. Moscow, Russia: Gosgeoltekhizdat Publ., 48 p. (In Russ.).
- Soloviev, V.M., Seleznev, V.S., Emanov, A.F., Kashun, V.N., & Zhemchugova, I.V. (2005). [Active vibroseismic monitoring in the northwestern part of the Altai-Sayan fold area]. In *Aktivnyi geofizicheskii monitoring litosfery Zemli: Materialy 2-go Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Active geophysical monitoring of the Earth's lithosphere: Proceedings of the 2nd International Symposium] (pp. 64-70). Novosibirsk, Russia: Publ. House SB RAS. (In Russ.).
- Tsibulchik, G.M., Zhalkovsky, N.D., & Moiseenko, F.S. (1964). [Results of seismic studies in the Altai-Sayan mountainous region]. In *Voprosy seismichnosti Sibiri. Trudy Instituta zemnoi kory. Vyp. 18 (red. A.A. Treskov)* [Seismicity issues in Siberia. Proceedings of the Institute of the Earth's Crust. Is. 18 (ed. A.A. Treskov)] (pp. 204-213). Novosibirsk, Russia: Publ. House SB AS USSR. (In Russ.).
- Zhalkovsky, N.D. (1967). [Some results of studies of seismicity of the Altai-Sayan mountain region]. In *Regional'nye geofizicheskie issledovaniia v Sibiri* [Regional geophysical surveys in Siberia] (pp. 170-183). Novosibirsk, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Zhalkovsky, N.D. (1988). *Zakon povtoriaemosti zemletriaseniia i nekotorye ego sledstviia* [The law of periodicity of earthquakes and some of its consequences]. Novosibirsk, Russia: IGiG SB AS USSR Publ., 29 p. (In Russ.).
- Zhalkovsky, N.D. (1989a). The law of periodicity of earthquakes and the problems of precursors. *Russian geology and geophysics*, 30(9), 93-99.
- Zhalkovsky, N.D. (1989b). On the magnitude and periodicity of the most powerful earthquakes. *Russian geology and geophysics*, 30(9), 99-105.
- Zhalkovsky, N.D. (1989c). On the similarity of the seismic process at the micro and macro levels. *Russian geology and geophysics*, 30(11), 113-117.
- Zhalkovsky, N.D., & Moiseenko, F.S. (1966). [Earthquakes in Western Siberia]. *Priroda* [Nature], 3, 82-86. (In Russ.).
- Zhalkovsky, N.D., & Muchnaya, V.I. (1987). On the accuracy of determining the slope of the earthquake periodicity graph. *Russian geology and geophysics*, 28(10), 121-129.
- Zhalkovsky, N.D., Kuchay, O.A., & Muchnaya, V.I. (1995). Seismicity and some characteristics of the stress state of the Earth's crust in the Altai-Sayan region. *Russian geology and geophysics*, 36(10), 20-30.
- Zhalkovsky, N.D., Tsibulchik, G.M., & Tsibulchik, I.D. (1965). Kamenskoe Earthquake on February 15, 1965. *Russian geology and geophysics*, 2, 116-125.
- Zyatkova, L.K. (1977). *Strukturalnaia geomorfologiya Altae-Saianskoi gornoj oblasti* [Structural geomorphology of the Altai-Sayan mountainous region]. Novosibirsk, Russia: Nauka Publ., 215 p. (In Russ.).

Information about authors

Emanov Aleksandr Fedorovich, Dr., Director of the Altai-Sayan Division of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (ASD GS RAS), Novosibirsk, Russia. E-mail: emanov@gs.nsc.ru

Emanov Aleksey Aleksandrovich, PhD, Deputy Director of the ASD GS RAS, Novosibirsk, Russia; Senior Researcher of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), Novosibirsk, Russia. E-mail: alex@gs.nsc.ru

Fateev Aleksandr Vladimirovich, Senior Researcher of the ASD GS RAS, Novosibirsk, Russia; Lead Engineer of the IPGG SB RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: fateev@gs.nsc.ru

Soloviev Victor Mikhailovich, PhD, Deputy Director of the ASD GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: solov@gs.nsc.ru

Shevkunova Elena Victorovna, Researcher of the ASD GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: elenash@gs.nsc.ru

Gladyshev Egor Andreevich, Junior Researcher of the ASD GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: gladyshev@gs.nsc.ru

Antonov Ilya Aleksandrovich, Sector Head of the ASD GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: antonov@gs.nsc.ru

Korabel'shnikov Dmitrij Gennad'evich, Chief Engineer of the ASD GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: korabel@gs.nsc.ru

Podkorytova Valentina Grigor'yevna, Researcher of the ASD GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: podk@gs.nsc.ru

Yankaytis Victor Victorovich, Department Head of the ASD GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: viktor@gs.nsc.ru

Elagin Semen Aleksandrovich, Researcher of the ASD GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: maelstrom2006@gmail.com

Serezhnikov Nikolaj Aleksandrovich, Researcher of the ASD GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: serezhnikov@gs.nsc.ru

Durachenko Aleksej Valer'evich, Researcher of the ASD GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: durachenko@gs.nsc.ru

Artemova Anna Igorevna, Researcher of the ASD GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: artemova@gs.nsc.ru