

УДК 550.834

**АЙГУЛАКСКАЯ ОЧАГОВАЯ ОБЛАСТЬ КАК РЕЗУЛЬТАТ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ЧУЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2003 г. НА ГОРНЫЙ АЛТАЙ****А.Ф. Еманов¹, А.А. Еманов^{1,2}, И.С. Новиков³, Е.А. Гладышев¹, А.В. Фатеев^{1,2},
П.О. Полянский¹, Е.В. Шевкунова¹, Р.А. Ершов¹, В.В. Арапов¹, А.А. Кривов⁴**¹ АСФ ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия³ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия⁴ Новосибирское высшее военное командное училище Министерства обороны РФ,
630117, Новосибирск, ул. Иванова, 49, Россия

Спустя несколько лет после Чуйского землетрясения 2003 г. сейсмически активизируются смежные с очаговой областью Чуйского землетрясения геологические структуры. Айгулакская очаговая область одна из них, но энергетически наиболее выраженная. Проведены детальные исследования с сетью станций Алтайского сейсмологического полигона, дополненной временными станциями. Активизирована область в виде локальной и компактной структуры размером 10×10 км с глубинами очагов от первых сотен метров до 20 км. Очаговая область не является дальнейшей активизацией вдоль одного и того же разлома с Чуйским землетрясением, а разместилась на субпараллельном разломе в узловой области с его разветвлением на три разлома. Сейсмическая активизация Айгулакской очаговой области — это не афтершоковый процесс после крупного землетрясения, а активизированная структура с динамично изменяющимся сейсмическим процессом. Интенсивный процесс сформировался с момента землетрясения в 2012 г. с $M_L = 6.1$ с постепенным уменьшением числа землетрясений, и в 2019 г. произошло Айгулакское землетрясение с $M_L = 5.5$ с очень сильным афтершоковым процессом после него. Результаты площадного изучения плотности землетрясений в очаговой зоне свидетельствуют об изменении режима во времени: от хаотичного до самоорганизующегося вдоль коротких разломов. Высказано предположение, что очаговая область не достигла максимального уровня выделения сейсмической энергии.

*Структура разломов, афтершоки, Айгулакское землетрясение, Горный Алтай***AIGULAK FOCAL AREA AS A RESULT OF THE IMPACT
OF THE 2003 CHUYA EARTHQUAKE ON GORNY ALTAI****A.F. Emanov, A.A. Emanov, I.S. Novikov, E.A. Gladyshev, A.V. Fateev, P.O. Polyansky,
E.V. Shevkunova, R.A. Ershov, V.V. Arapov, A.A. Krivov**

Years after the Chuya earthquake of 2003, geological structures adjacent to the focal area of the Chuya earthquake are still seismically active. The Aigulak focal area is one of them, but energetically the most pronounced. Detailed studies have been carried out with the network of stations of the Altai seismological testing site, supplemented by temporary stations. The region activated in the form of a local and compact structure measuring 10×10 km with focal depths from the first 100 m to 20 km. The focal area is not a subsequent activation along the same fault with the Chuya earthquake, but is located on a subparallel fault in the nodal region with its branching into three faults. The seismic activation of the Aigulak focal area is not an aftershock process after a major earthquake, but is an activated structure with a dynamically changing seismic process. An intensive process has formed since the earthquake in 2012 with $M_L = 6.1$ with a gradual decrease in the number of earthquakes, and in 2019 the Aigulak earthquake with $M_L = 5.5$ occurred with a very strong aftershock process after it. Our results of an area study of earthquake density in the focal zone indicate a change in the regime over time: from chaotic to self-organizing along short faults. We conclude that the focal area has not reached the maximum level of seismic energy release.

*Fault structure, aftershocks, Aigulak earthquake, Gorny Altai***ВВЕДЕНИЕ**

Чуйское землетрясение 2003 г. с $M_S = 7.3$ является наиболее крупным сейсмическим событием Алтая за период инструментальных наблюдений (с 1963 г.) [Гольдин и др., 2004а, 2004б]. Оно стало основой формирования большой сейсмически-активной очаговой области [Еманов и др., 2009] с изме-

© Еманов А.Ф., Еманов А.А., Новиков И.С., Гладышев Е.А., Фатеев А.В., Полянский П.О., Шевкунова Е.В., Ершов Р.А., Арапов В.В., Кривов А.А., 2024

✉ e-mail: alex@gs.nsc.ru

няющейся в первый месяц развития структурой активности в пространстве и с фазами активности во времени. Чуйское землетрясение вызвало значимые изменения в сейсмичности Алтае-Саянской горной области в целом и Горного Алтая в частности [Еманов и др., 2017, 2023a]. Изменчивость структуры активности очаговой области связана, прежде всего, с двумя крупными афтершоками с $M_s = 6.4$ и 6.7 . Особенно значимые изменения в структуре афтершокового процесса наблюдались после второго из них [Еманов и др., 2009].

В последующие годы сейсмичность эпицентральной области Чуйского землетрясения проявила себя как устойчивая в сейсмической активности система тектонических элементов. Их структура хорошо соответствует блоковому строению очаговой области как в площадном варианте [Еманов и др., 2022], так и в объемном [Еманов и др., 2021в].

Эпицентральная зона Чуйского землетрясения 2003 г. расположена вдоль разлома, протягивающегося из Монголии, при этом афтершоковая активность на северо-западном окончании очаговой области соответствует изгибу этого разлома к северу и поперечному сечению этого разлома другим. Спустя почти десятилетие после Чуйского землетрясения произошли изменения в сейсмичности смежных структур [Еманов и др., 2017]. К этим смежным структурам через несколько лет добавились сейсмические активизации в ряде направлений на удалениях порядка 60—80 и 250—450 км [Еманов и др., 2023a]. Айгулакское землетрясение 2019 г. с $M_L = 5.5$ вызвало сильную сейсмическую активизацию в смежной с очаговой областью Чуйского землетрясения структуре. В течение 2019 г. по числу землетрясений и по суммарной выделившейся сейсмической энергии сравнительно небольшая очаговая область Айгулакского землетрясения превзошла существенно большую по площади очаговую область Чуйского землетрясения [Еманов и др., 2023б]. До этого сейсмичность очаговой области Чуйского землетрясения доминировала над сейсмичностью других тектонических структур Горного Алтая.

Айгулакская очаговая область и очаговая область Чуйского землетрясения 2003 г. разместились в тектонически сложнопостроенной части Горного Алтая. Представления о том, что современный рельеф Горного Алтая является результатом молодых тектонических движений, были сформированы относительно давно. Первоначально считалось, что он возник при вертикальных блоковых [Обручев, 1915] или сводовых движениях [Granö, 1917]. Позднее возникла комбинированная модель, в рамках которой полагалось, что рельеф Алтая был образован при сочетании этих типов движений [Нехорошев, 1936]. Существенная роль горизонтальных движений в формировании рельефа Алтая была впервые обозначена в начале 1970-х [Дергунов, 1972]. Позднее для прилегающих территорий Алтая были разработаны представления о доминирующей роли правосдвиговых смещений как результата удаленного воздействия Индо-Евразийской коллизии [Новиков, 1998, 2004; Буслов и др., 2003; Новиков и др., 2014]. Кроме того, на ограниченных территориях проведены исследования, позволившие современными методами подтвердить или уточнить кинематику отдельных разломов [Дельво и др., 1995; Буслов и др., 1999; Rogozhin et al., 2007; Рогожин и др., 2008; Glorie et al., 2012; Delvaux et al., 2013; Ветров и др., 2016; Деев, 2019; Деев и др., 2022; Deev et al., 2017, 2023, 2024; Turova et al., 2020; Корженков и др., 2022, Сим и др., 2023].

Обнаженность многих новейших разломных зон на территориях с горным рельефом недостаточна для того, чтобы определить кинематические характеристики разломов прямыми геологическими методами. Применительно к рассматриваемой территории геологические данные есть для северной границы Курайско-Чуйской системы впадин, изучена система взбросов с небольшой правосдвиговой составляющей [Бондаренко, 1976], а для южной границы этих впадин известны разломы с правым сдвигом [Lunina et al., 2008; Высоцкий и др., 2021].

Данные о кинематике отдельных структур использовались для компьютерного моделирования поля деформаций [Бондаренко, 1976; Бабичев и др., 2009]. Более полную картину дает сопоставление природной и эталонной сетей разломов, позволяющее принимать решение о поле напряжений, формировании и кинематических характеристиках разрывных нарушений конкретного региона [Семинский, 2014, 2015].

Алтайский сейсмологический полигон [Еманов и др., 2016] обладает повышенной плотностью стационарных сейсмологических станций и является местом постоянных экспериментов с детальными сетями временных станций. С повышением сейсмической активности в Айгулакской очаговой области число временных станций в ней было увеличено [Еманов и др., 2021б; 2023б; Гладышев и др., 2023]. Экспериментальные сейсмологические работы в зоне северо-западного окончания очаговой области Чуйского землетрясения и в районе Айгулакской очаговой области достигли нового уровня точности и информативности. Появилась возможность определять механизмы очагов землетрясений с существенно меньшей энергией, чем ранее. Подробное описание методики получения и обработки сейсмологической информации, применяемой для Алтайского сейсмологического полигона, представлено в [Еманов и др., 2018].

В данной работе рассматривается ряд вопросов. В первую очередь, это закономерности возникновения и развития сейсмичности Айгулакской очаговой зоны. Во-вторых, это выявление связи структуры

сейсмически активизированных разломов с имеющейся для этого района моделью разломной структуры. И, наконец, исследуется возможная связь в развитии сейсмичности двух смежных очаговых зон — Чуйской и Айгулакской.

СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЙГУЛАКСКОЙ АКТИВИЗАЦИИ

Интерес к изучению сейсмической активности Айгулакской очаговой области достиг своего максимума после Айгулакского землетрясения 13.09.2019 с $M_L = 5.5$, вызвавшего мощный афтершоковый процесс: только в 2019 г. зафиксировано более 3000 афтершоков. Поскольку данное землетрясение не является самым сильным из зарегистрированных в рассматриваемой очаговой области, в изучении процесса в целом целесообразно раздвинуть временные рамки и охватить историю возникновения и развития сейсмичности в данном районе.

Сейсмическая активность Чуйско-Курайской области на уровне землетрясений малых энергий (энергетический класс порядка 7—9) в период с 1963 по 2003 г. фиксировалась постоянно [Жалковский и др., 1995; Еманов и др., 2021a]. При этом Айгулакская очаговая область в тот временной интервал представляла собой локальный участок со слабовыраженной сейсмичностью. В период до 2002 г. в данном районе работала лишь одна сейсмическая станция, что обуславливало недостаточные точность регистрации и энергетическую представительность. Ситуация в этом районе изменилась в 2002 г. [Еманов и др., 2016], и с этого времени Горный Алтай изучается на новом уровне представительности регистрации землетрясений и точности определения параметров их очагов.

Рассмотрим сейсмичность в районе Айгулакской очаговой области после Чуйского землетрясения. На рисунке 1 представлены данные о сейсмичности Чуйско-Курайской зоны, наглядно показывающие изменение сейсмического режима во времени [Еманов и др., 2017]. В период 2003—2009 гг. структура сейсмически активизированных разломов устойчива и хорошо видна на карте плотности очагов для этого периода [Еманов и др., 2022]. В левом верхнем углу видны скопления очагов землетрясений — это и есть Айгулакская очаговая область. Сейсмичность после Чуйского землетрясения 2003 г. там фиксируется, хотя и не идет в сравнение с сейсмичностью очаговой области Чуйского землетрясения. На картах землетрясений 2015 и 2016 гг. можно отметить существенное изменение сейсмического режима Чуйско-Курайской зоны. Сейсмическая активизация охватила смежные с очаговой областью Чуйского землетрясения 2003 г. геологические структуры, при этом наиболее активной зоной является Айгулакская очаговая область.

На рисунке 1 показаны разломы, являющиеся границами блоков [Новиков, 1998, 2004]. Очаговая область Чуйского землетрясения соответствует сдвиговой разломной зоне [Гольдин и др., 2004б]. В данной работе рассматривается северо-западное окончание области афтершокового процесса Чуйского землетрясения на предмет связи активности этой очаговой структуры с активностью смежных структур. На данном северо-западном окончании видна структура разломов типа «конский хвост», характерная для сдвиговой подвижки. Разлом протянулся далеко к северу от окончания очаговой области, однако сейсмичность вдоль него отсутствует. Развитие сейсмичности длинных разломов хорошо исследовано в [Палеосейсмология, 2011], где описано понятие «сегментация разрывов»: протяженные активные разломы при больших исторических землетрясениях вскрываются лишь частично. Поверхностные разрывы часто заканчиваются на участках структурного изменения строения разлома; с этим фактом связано понятие «устойчивые очаговые сегменты» [Палеосейсмология, 2011]. Согласно данной работе, очаговый разрыв всегда будет располагаться в пределах отдельного сегмента длинного разлома.

Данные утверждения, вероятнее всего, являются обоснованной моделью для описания сейсмичности на длинных разломах. Модель привлекательна тем, что при разбиении разлома на сегменты можно обосновать максимально возможные магнитуды землетрясений для каждого из них.

В соответствии с рис. 1 очаговая область Чуйского землетрясения 2003 г. заканчивается в районе структурных изменений сдвигового разлома. Таким образом, в Айгулакской очаговой области формируется обособленная сейсмическая активизация.

На рисунке 2 представлены эпицентры землетрясений, произошедших в Чуйско-Курайской зоне и в смежных структурах в 2019 г. Можно видеть, что в сравнительно небольшой Айгулакской очаговой области сосредоточено большое количество землетрясений и при этом наиболее сильных. В момент Айгулакского землетрясения 13.09.2019 на Алтайском сейсмологическом полигоне работала детальная сеть временных станций, соответственно, при изучении главного толчка и афтершокового процесса использованы данные с 8—10 станций в очаговой области.

На рисунке 3 представлена карта эпицентров землетрясений в Чуйско-Курайской области и смежных структурах для периода работы временной сети станций в 2021 г. Следует отметить, что спустя два года после Айгулакского землетрясения сохраняется высокая активность в Айгулакской очаговой области.

На рисунке 4, а представлен сейсмический процесс в Айгулакской очаговой области с 2011 по 2023 г., в период его максимального развития. Следует отметить, что в данной очаговой области зафик-

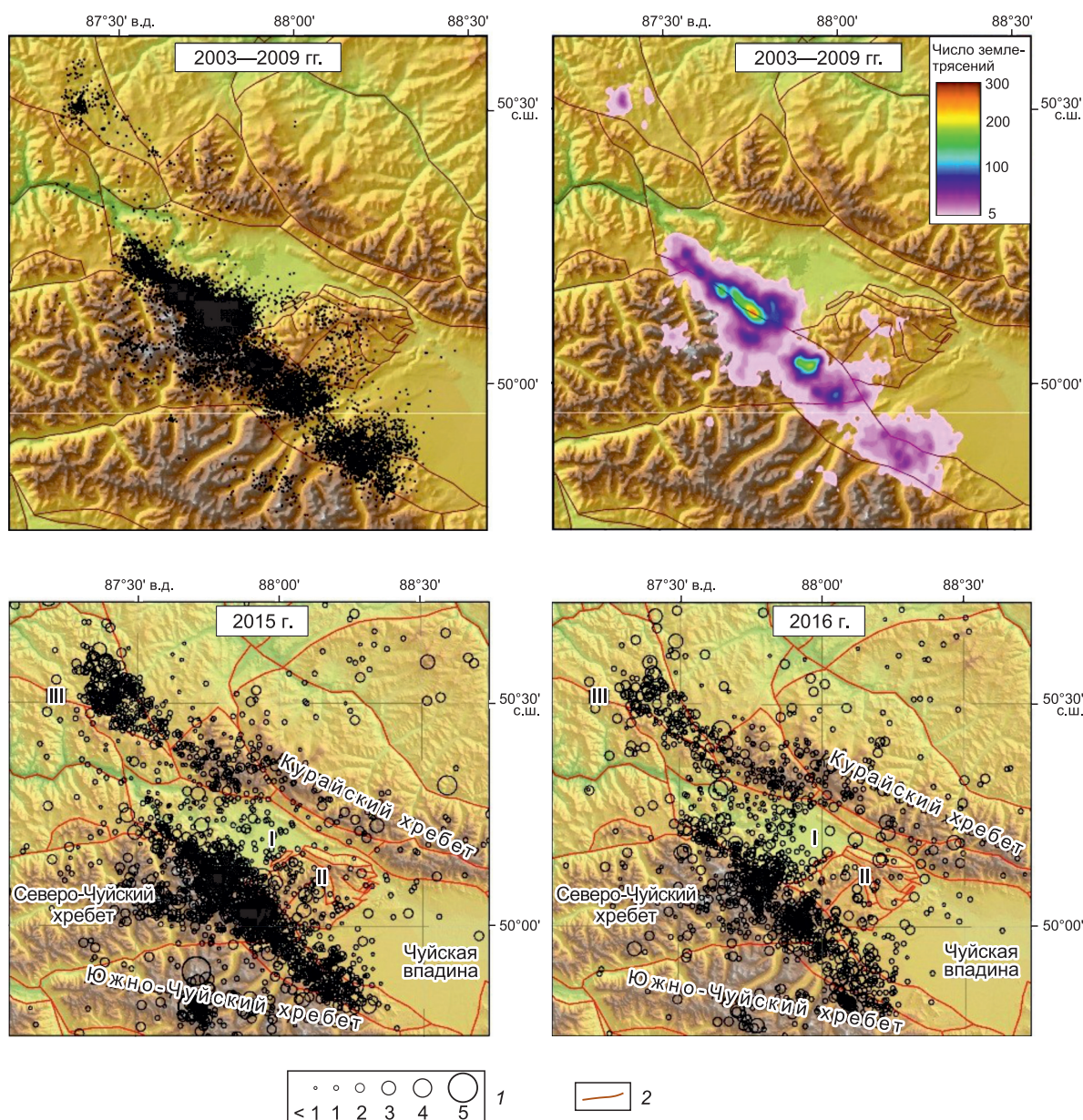


Рис. 1. Сейсмическая активизация очаговой области Чуйского землетрясения и смежных структур:

I — Курайская впадина, II — Чаган-Узунский блок, III — Айгулакский хребет. 1 — магнитуда землетрясения (M_L), 2 — новейшие разломы.

сировано много землетрясений и с $M_L < 1$. Но поскольку большее их число регистрировалось в периоды работы временных станций, для анализа используется лишь заведомо представительная [Еманов и др., 2023] часть каталога с $M_L \geq 1$. Самое крупное землетрясение в этой очаговой области произошло 30.07.2012 с $M_L = 6.1$, за которыми последовал мощный афтершоковый процесс: до конца 2019 г. было зафиксировано около 3200 землетрясений. Это на порядок превысило число событий в существенно бо́льшей по площади очаговой области Чуйского землетрясения за тот же период (около 350 событий). Период начиная с 2019 г. (см. рис. 4) стал наиболее сейсмически-активным для Айгулакской очаговой зоны, при том, что самое сильное землетрясение произошло здесь в 2012 г. После него наблюдается повышенное количество землетрясений, и не вполне ясно, следует ли рассматривать их как афтершоки или роевую серию в данной очаговой области. Существенное ослабление сейсмичности Айгулакской зоны произошло в 2015 г., но 2019 г. стал началом нового усиления ее активности.

Сейсмическая активизация в Айгулакской очаговой области началась в виде слабой роевой сейсмичности, а затем усилилась после землетрясения 30.07.2012 с $M_L = 6.1$. Выход активизации на новый

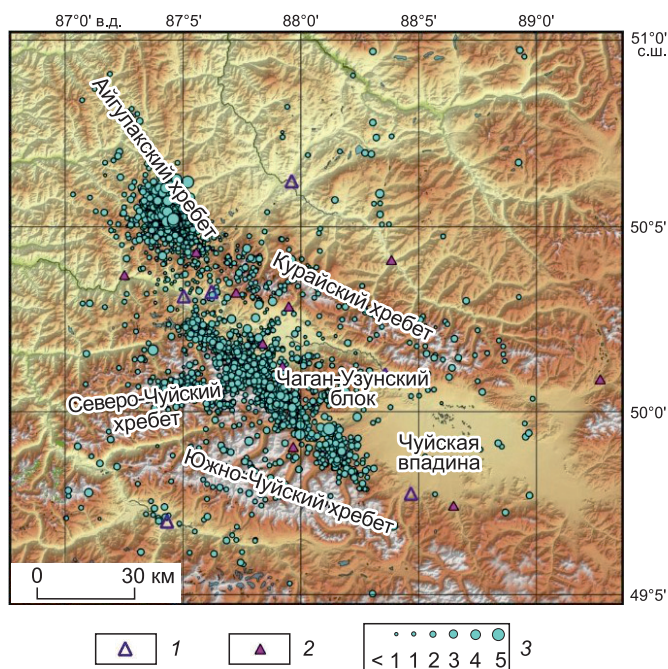


Рис. 2. Карта землетрясений Чуйско-Курайской зоны и смежных структур в 2019 г.:

1 — станции региональные, 2 — станции временной сети, 3 — магнитуда землетрясений (M_L).

уровень произошел после Айгулакского землетрясения 13.09.2019 с $M_L = 5.5$. Чтобы понять, что представляет из себя Айгулакская очаговая область и как протекает сейсмическая активизация (в виде сильного землетрясения с длинным афтершоковым процессом или в виде серии землетрясений с короткими и подобными афтершоковыми процессами), рассмотрим развитие сейсмической активности очаговой области для периода 2019—2020 гг., характеризующегося резким ростом количества землетрясений (рис. 4, б).

Совершенно ясно, что Айгулакское землетрясение 2019 г. не является афтершоком землетрясения 2012 г., так как оно произошло на фоне значительного снижения сейсмичности. После него сформировалась сейсмическая

активизация, в начальный период представляющая собой афтершоковый процесс с быстрым снижением количества событий со временем. Однако дальнейшее развитие событий не является простым процессом с одним крупным землетрясением и убывающим по экспоненте числом афтершоков. Происходят неоднократные моменты всплеска сейсмической активности Айгулакской очаговой зоны. Наблюдается выраженное увеличение числа землетрясений после события 27.06.2020 с $M_L = 4.1$ и особенно после землетрясения 31.07.2020 с $M_L = 4.7$.

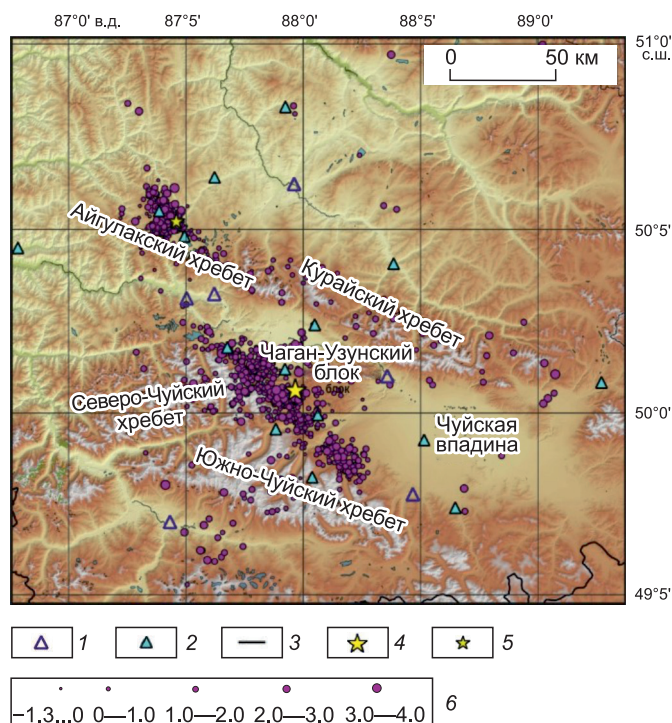
Следует отметить, что далеко не все сильные (с $M_L \geq 4$) землетрясения оказывают заметное влияние на общее развитие сейсмичности в Айгулакской зоне. К примеру, землетрясение 25.11.2020 вызвало лишь едва заметный рост количества землетрясений малых энергий, тогда как землетрясения 21.06.2019 и 11.03.2020 вообще не вызвали сколько-нибудь заметного изменения характеристик сейсмического процесса (см. рис. 4, б).

Одновременно с изучением сейсмичности Горного Алтая выполняются работы по изучению модели среды и, прежде всего, структуры разломов. На рисунке 5 представлена структура разломов, уточненная относительно конфигурации, показанной на рис. 1. Тем не менее и в этом случае эпицентры землетрясений не соответствуют разломной структуре.

То, что Айгулакское землетрясение произошло на Алтайском сейсмологическом полигоне (и без того имеющего повышенную плотность сети стационарных станций относительно региона в целом) в момент работы детальной сети станций [Еманов и др., 2021б],

Рис. 3. Карта землетрясений Чуйско-Курайской зоны и смежных структур в период работы временной сети станций (с 26.06.2021 по 10.10.2021 г.):

1 — станции региональные, 2 — станции временной сети, 3 — государственные границы, 4 — Чуйское землетрясение 2003 г., 5 — Айгулакское землетрясение 2019 г., 6 — магнитуда землетрясений.



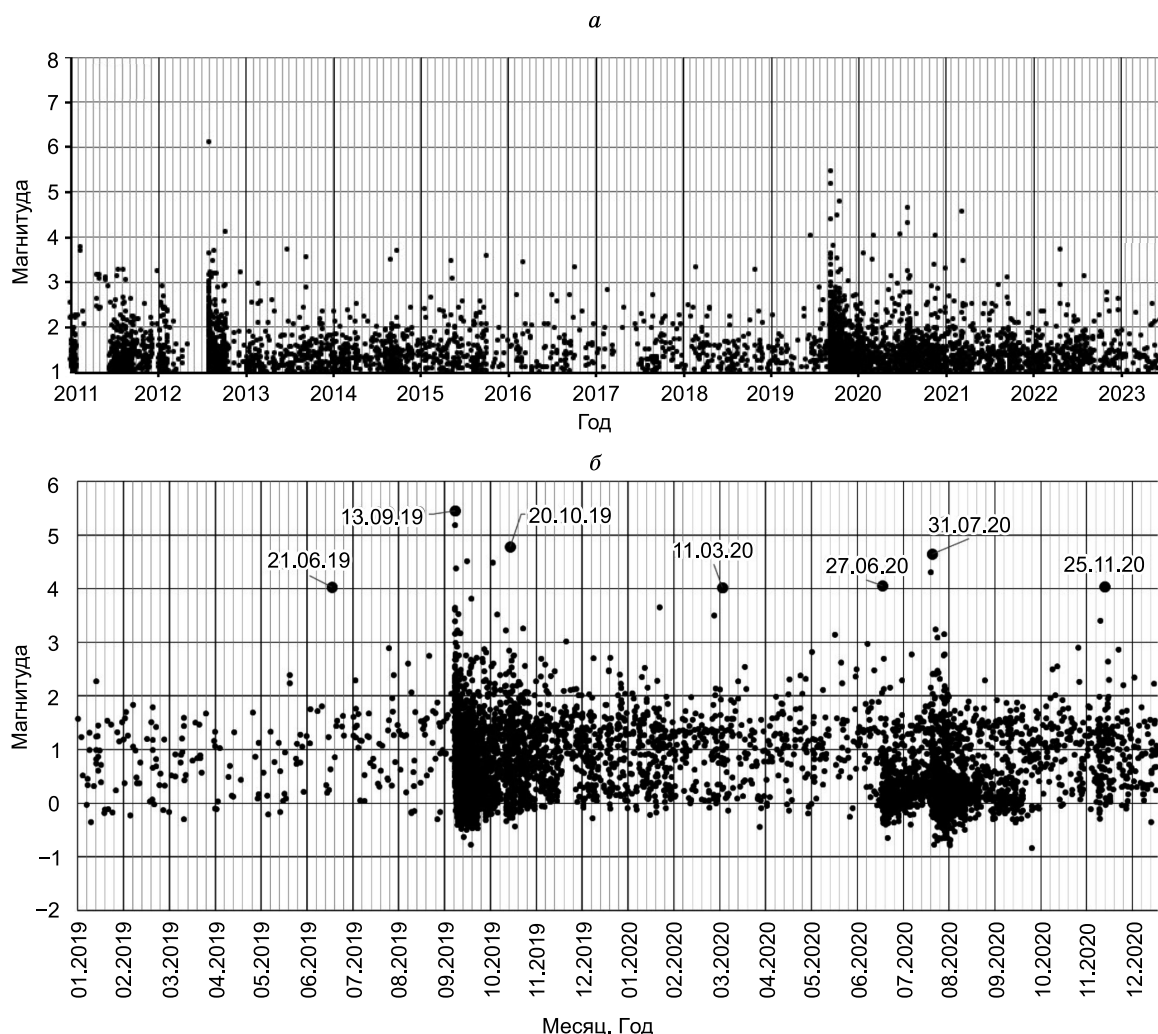


Рис. 4. Развитие сейсмического процесса в Айгулакской очаговой области.

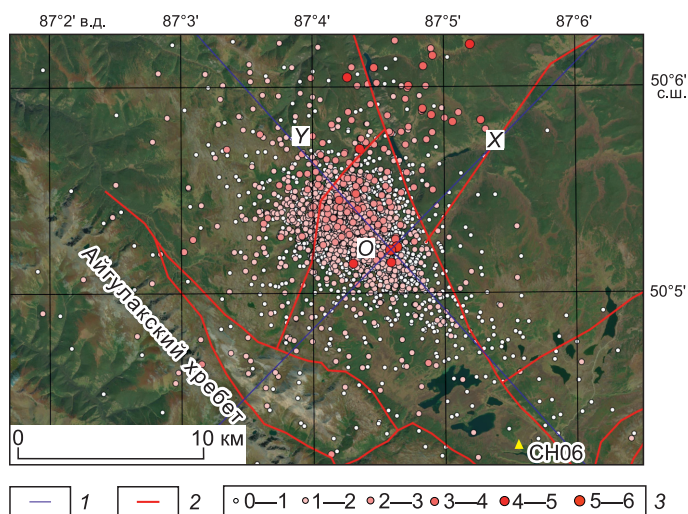
a — интервал с 2011 по 2023 г., *б* — детальное рассмотрение интервала с 2019 по 2020 г.

позволяет с высокой точностью определить параметры гипоцентров сейсмических событий. Представляет интерес объемная структура очаговой области, построенная на основе расчета глубин очагов землетрясений.

На рисунке 6 видно, что сейсмически активизирована довольно компактная разломная структура с близкими значениями длины и ширины (около 4 км) и с глубинами очагов от сотен метров до 20 км с наибольшим количеством событий на глубинах от 1 до 17 км. Из разреза по линии *ОХ* следует, что наблюдается активизация вертикального разлома.

Рис. 5. Карта эпицентров землетрясений Айгулакской очаговой зоны в 2019 г.:

1 — оси проекции, *2* — разломы, *3* — магнитуда землетрясений (M_L), *4* — сейсмостанция.



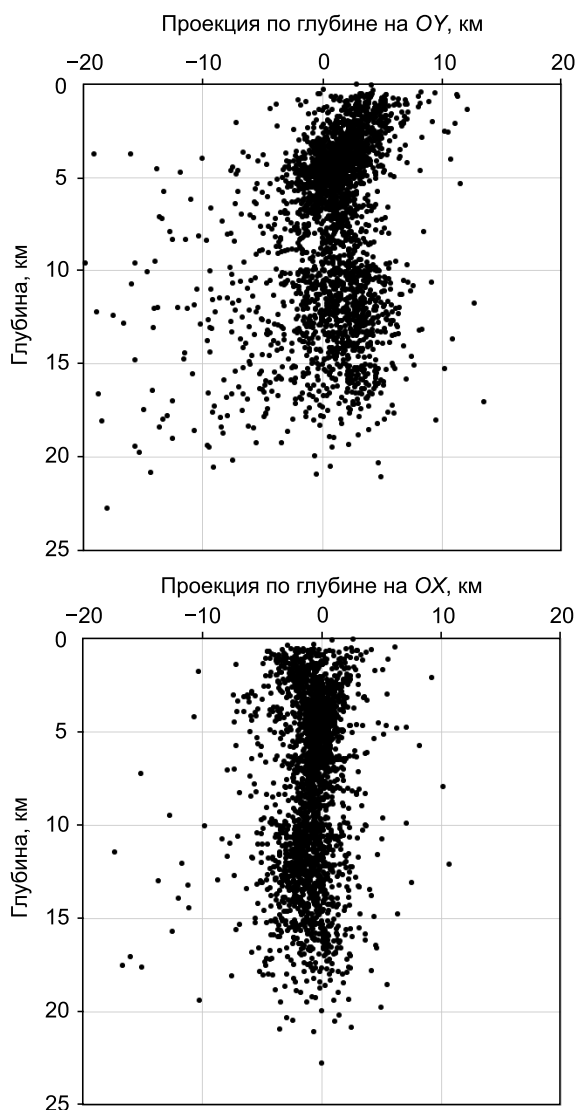


Рис. 6. Разрезы афтершокового процесса Айгулакского землетрясения 2019 г. по двум перпендикулярным осям в соответствии с рис. 5.

В соответствии с разрезом *ОУ* для глубин более 5 км активизация вертикальна, и лишь для интервала 1—5 км обнаруживается наклон активизации с юго-востока на северо-запад.

Перейдем к рассмотрению плотности очагов землетрясений Айгулакской зоны. В 2017 и 2018 гг. (рис. 7, *а, б*) сейсмическая активность достаточно мозаична, и даже при высокоточных определениях координат процесс можно рассматривать как отражение крупномасштабной блочной структуры без полного проявления активности ее границ. В 2019 г. (см. рис. 7, *в*) наблюдается принципиально иной процесс, в котором доминирует активизация одного элемента разлома.

На рисунке 7, *в—д* видно, что выраженные в сейсмичности элементы разлома не совпадают ни с одним тектоническим нарушением на карте. Это означает, что разломная модель требует детализации на основе учета развития сейсмичности. В 2022 г. (см. рис. 7, *е*) сейсмичность в Айгулакской очаговой зоне вновь становится более мозаичной и охватывает иные тектонические элементы, чем в 2019—2021 гг.

Важной информацией для построения блоковой модели среды являются данные о механизмах очагов землетрясений. На рисунке 8 приведены определения механизмов в Айгулакской очаговой зоне. Для всех землетрясений характерным фокальным механизмом является сдвиг.

ГЕОТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ АЙГУЛАКСКОЙ ОЧАГОВОЙ ЗОНЫ

Основными сейсмогенерирующими структурами Центрального Алтая являются северо-западные продолжения главных новейших правых сдвигов Монгольского Алтая, включая серию субпараллельных разломных зон северо-западного простирания. Система сейсмогенерирующих структур состоит (с северо-востока на юго-запад) из Кобдинского, Толбонурского, Сагсайского и Фуюньского разломов [Хилько и др., 1985; Новиков и др., 2004]. Курайская система взбросов и надвигов является транспрессионным изгибом одного из северных ответвлений Кобдинского разлома. Чуйская разломная зона, с которой связана одноименная сейсмическая активизация, начавшаяся в 2003 г. и с периодическими затуханиями продолжающаяся до настоящего времени, является северо-западным продолжением Толбонурской сейсмогенерирующей структуры. Далее на северо-запад она продолжается практически до низогорной части Северо-Западного Алтая, ограничивая с севера Коргонский и Тигирецкий хребты. В районе западного окончания Курайского хребта происходит сближение Курайской и Чуйской новейших разломных зон, и одно из правосдвиговых продолжений Курайской зоны причленяется к Чуйской разломной зоне, пересекающей здесь по сквозной долине Айгулакский хребет и образующей северную границу Айлагушского хребта. На северной границе Сорлукельской межгорной котловины к востоку от Айлагушского хребта и к северу от Айгулакского хребта происходит сейсмическая активизация, связанная с правым сдвигом, сочленяющим Курайскую и Чуйскую разломные зоны [Гладышев и др., 2023] (рис. 9).

На рисунке 10 для Чуйско-Курайской зоны представлена модель разломно-блоковой структуры, в составлении которой основную роль играл морфотектонический метод с верификацией на основе сейсмологических данных.

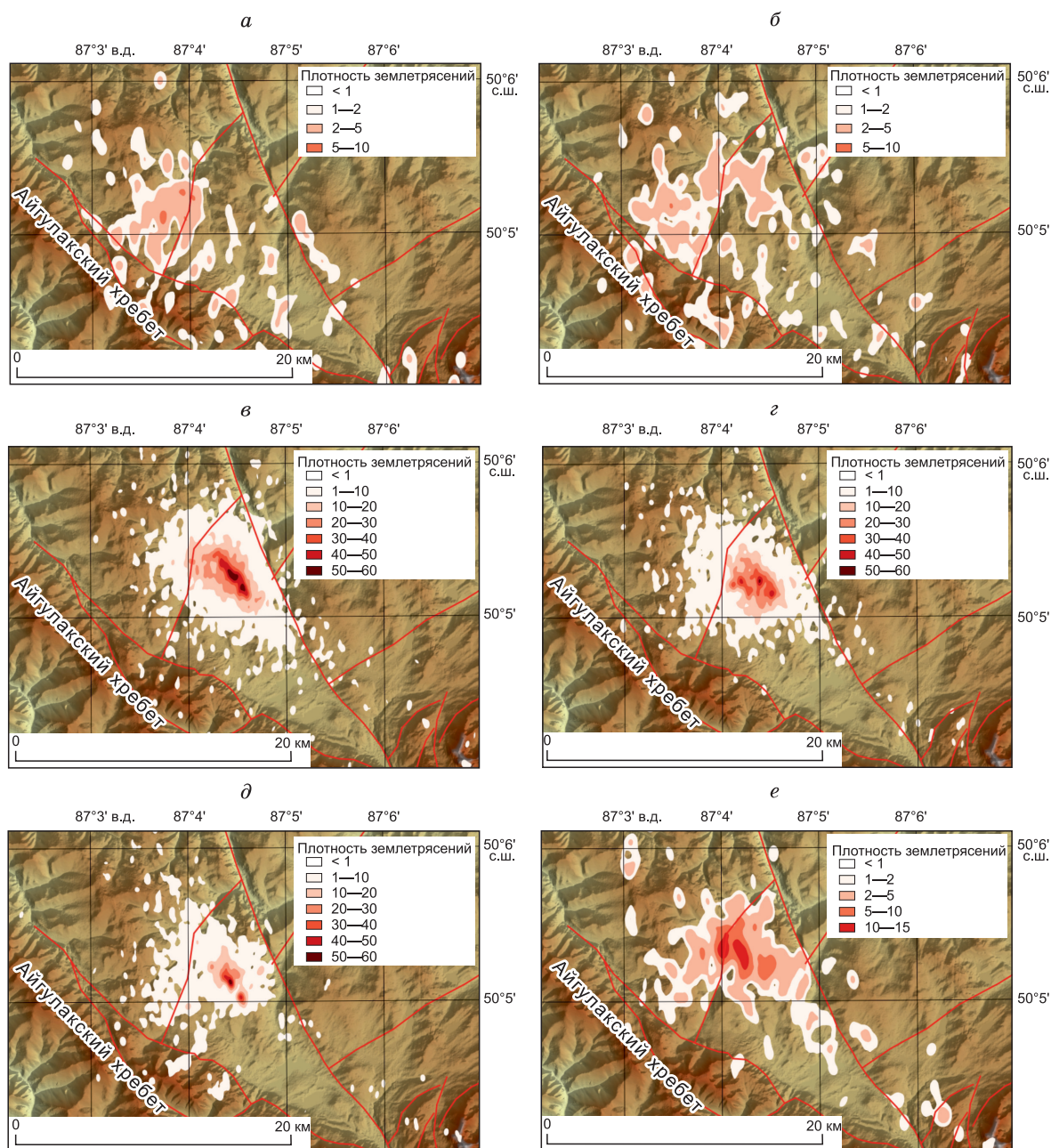


Рис. 7. Плотность землетрясений в районе Айгулакского хребта в период с 2017 по 2022 г.:

a — 2017 г., *б* — 2018 г., *в* — 2019 г., *з* — 2020 г., *д* — 2021 г., *е* — 2022 г. Красные линии — разломы.

На рисунке 10 представлены данные о разломной структуре Алтая и о кинематике разломов [Новиков, 2004; Новиков и др., 2008], совершенствуемые в последние годы. В соответствии с этой картой очаговые области Чуйского и Айгулакского землетрясений располагаются в районе разломов со сдвиговой кинематикой. Как уже отмечалось, эпицентральная область Чуйского землетрясения приурочена к фрагменту разлома, идущего из Монголии в северо-западном направлении и далее меняющему направление на северное (см. рис. 1).

Сейсмически-активная Айгулакская очаговая область приурочена к сдвиговой системе разломов с разветвлением, при этом одна из ветвей за Айгулакской зоной смыкается со сдвиговым разломом, идущим из эпицентральной области Чуйского землетрясения.

На рисунке 11 дан фрагмент карты (см. рис. 10), где отчетливо видно, что продолжение сдвигового разлома из Чуйской очаговой зоны сейсмически не активно. Айгулакская активизация возникла и развивается на параллельном сдвиговом разломе. Ветвление разломов к северу от Айгулакской очаго-

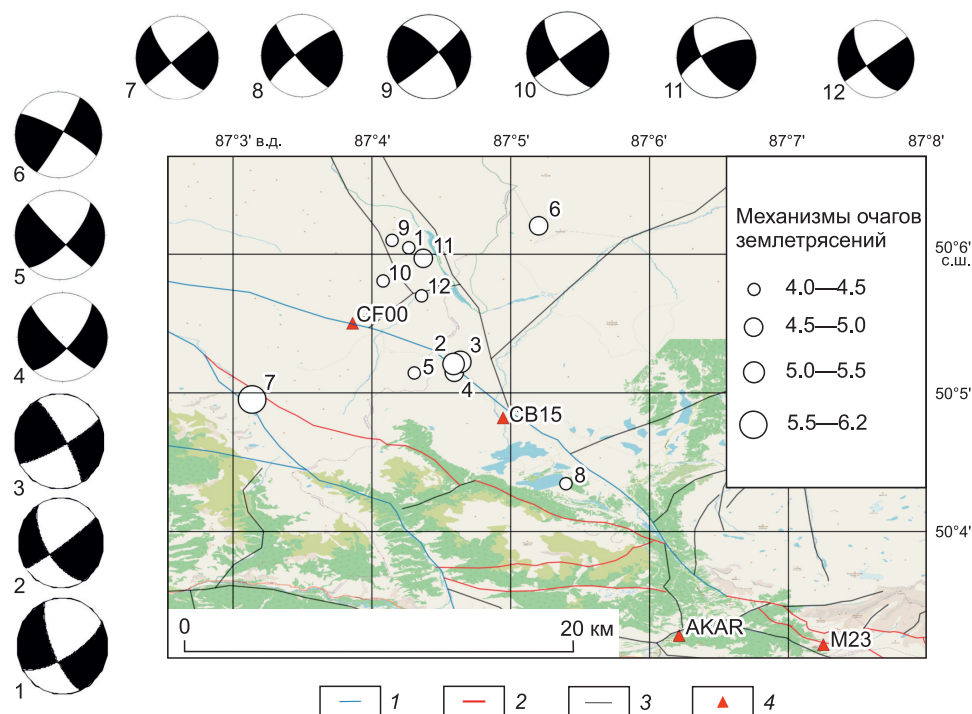
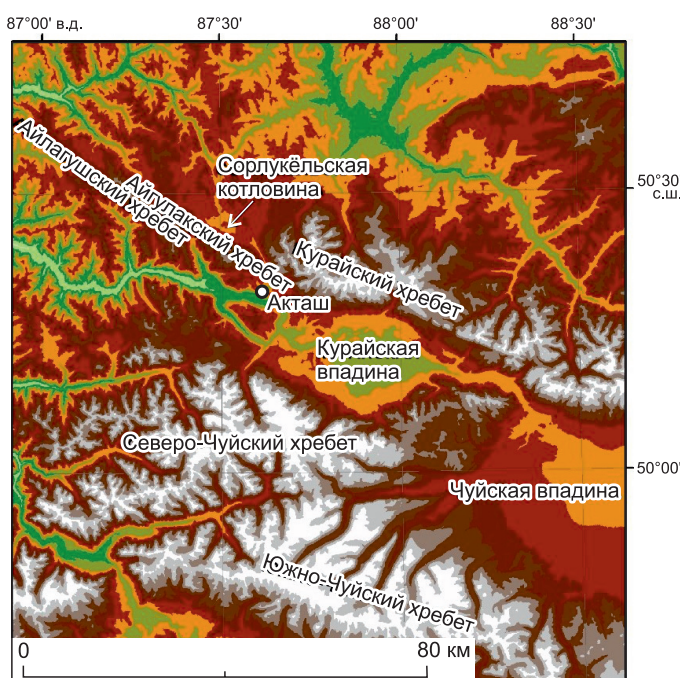


Рис. 8. Механизмы очагов землетрясений Айгулакской эпицентральной зоны:

1 — сбросы и раздвиги, 2 — взбросы и надвиги, 3 — правые сдвиги и взбрососдвиги, 4 — сейсмостанция.

вой зоны указывает, что в случае распространения к северу сейсмическая активность может сместиться на тот же разлом, на котором произошло Чуйское землетрясение, а может и начать развиваться по иной ветви разломной структуры.

Безусловно, обе сейсмоактивные зоны связаны друг с другом, но не как продолжение друг друга, а как активизации разных границ блоковой структуры. Учитывая сложную форму блоков и структуру разломов в Горном Алтае, важным является вопрос о дальнейшем развитии в пространстве существующей на Алтае сейсмической активизации.



На рисунках 9 и 11 видно, что из очаговой области Чуйского землетрясения редкие цепочки землетрясений, пересекая осадочные структуры впадин, протягиваются к Курайскому и Айгулакскому хребтам. Без сомнения, разрядка напряженного состояния в очаговой области Чуйского землетрясения не завершилась полностью, и частично оно передается на другую сторону более стабильного блока, скапливаясь в узловой разломной структуре Айгулакской очаговой зоны. Релаксация напряженного состояния от очага Чуйского землетрясения охватила смежные структуры вокруг эпицентра Чуйского землетрясения [Еманов и др., 2017, 2023а]. Подобный процесс наблюдается в разных направлениях от очага крупного землетрясения, но наиболее сильное развитие он получил в

Рис. 9. Орографическая карта района исследований.

Рис. 10. Модель разломной структуры Горного Алтая:

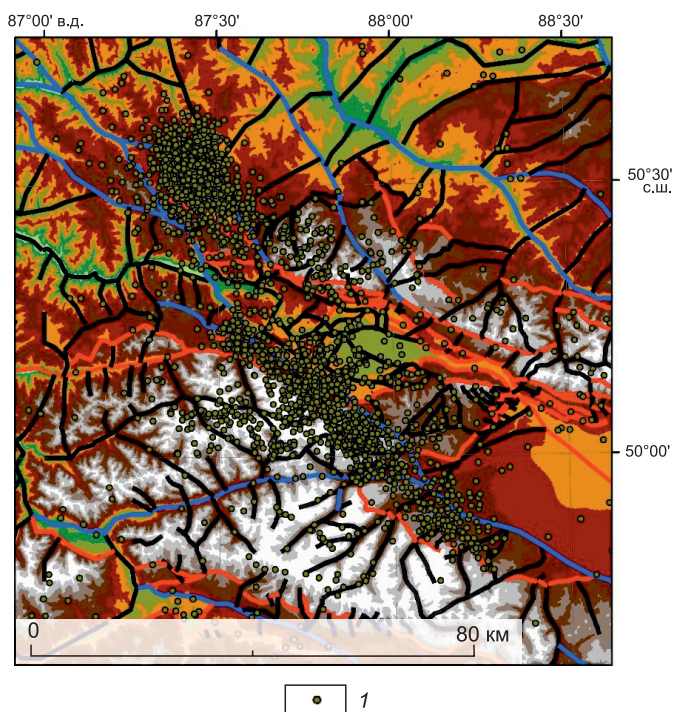
1 — неидентифицированные, 2 — сбросы и раздвиги, 3 — взбросы и надвиги, 4 — правые сдвиги и взбрососдвиги.

Айгулакской очаговой области. Накоплению напряженного состояния в этом узле тектонических разломов способствовало его сложное строение.

Как было показано выше (см. рис. 1), сейсмичность Горного Алтая после Чуйского землетрясения 2003 г. в первом десятилетии XXI в. преимущественно была сосредоточена в его очаговой области. Последующий период активизации смежных структур представлен на карте плотности очагов землетрясений (рис. 12), где маленький размер площадки позволяет с высоким разрешением видеть структуру сейсмичности данного района.

В указанный период отчетливо видна сейсмическая активизация смежных с очаговой областью Чуйского землетрясения структур. Наиболее сейсмически-активной является Айгулакская очаговая область. Заметны также сейсмические активизации и в других направлениях — в Курайском, Южно-Чуйском и Северо-Чуйском хребтах. Активизация смежных структур — это развивающийся во времени и пространстве процесс. Важно понять направления дальнейшего развития сейсмичности в пространстве и особенно, когда это развитие связано с сейсмическими активизациями в населенных районах.

Проблемой является разное видение структуры разломов Горного Алтая разными авторами. На региональной карте разломов (см. рис. 12, б) Айгулакская очаговая область разместилась между разломами, а сейсмическая активность вдоль Курайского хребта соответствует его структуре разломов. К северу от Айгулакской очаговой области развитие сейсмичности происходит вдоль линейной зоны, не совпадающей с известными разломами.



При этом на рис. 12, а карта плотности землетрясений совмещена с более поздней и сильнее детализированной структурой разломов с их кинематикой. В этом случае Айгулакская очаговая область примыкает к узлу сложной разломной структуры. Развитие активизации в северном направлении лучше согласуется с уточненной моделью разломов.

В соответствии с рис. 12 в течение 2010—2022 гг. оформились изменения в сейсмичности и, соответственно, в напряженном состоянии смежных с очаговой областью Чуйского землетрясения 2003 г. геологических структур. По группированию слабой сейсмичности в указанный период имеется возможность оценить разломы и блоки на предмет миграции сейсмической активности. Айгулакская очаговая область является узловой струк-

Рис. 11. Очаговые зоны (Чуйская и Айгулакская) и модель разломных зон.

Остальные усл. обозн. см. на рис. 10.

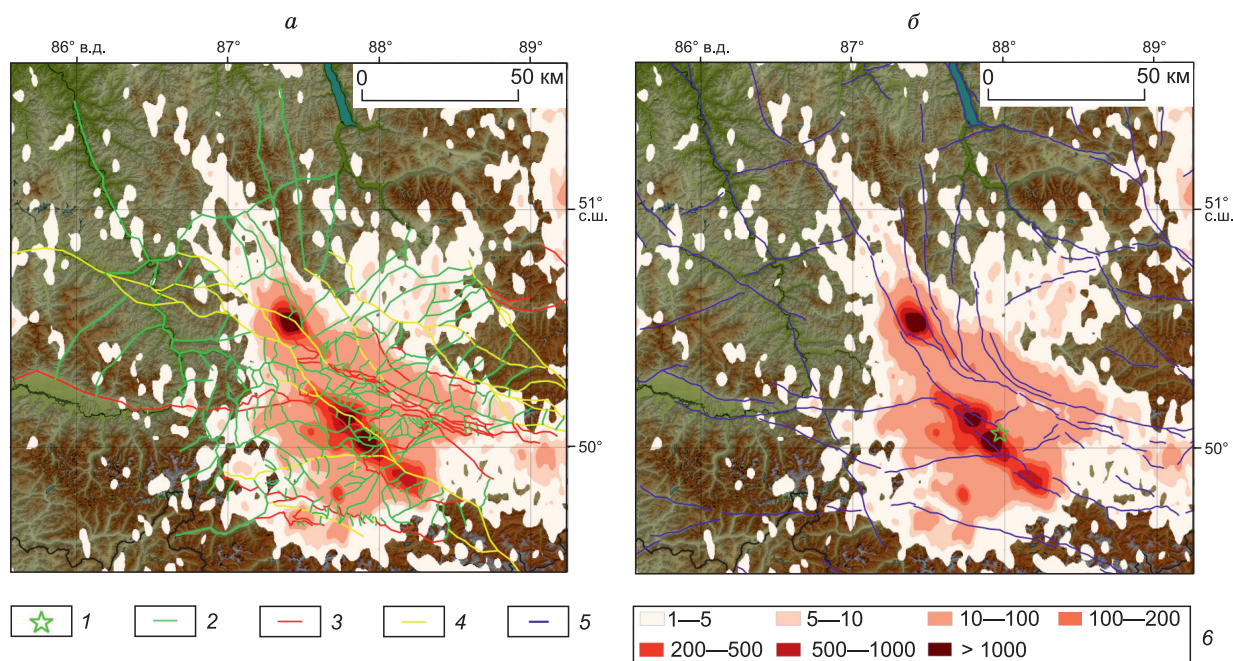


Рис. 12. Карта плотности землетрясений Горного Алтая с 2010 по 2022 г.

a — детализированные разломы [Новиков, 2004], дополненные авторами; *б* — разломы ГИН РАН [Трифонов, 1999]: 1 — эпицентр Чуйского землетрясения, 2 — сбросы и раздвиги, 3 — взбросы и надвиги, 4 — правые сдвиги и взбрососдвиги, 5 — разломы, *б* — плотность землетрясений.

турой, через которую или рядом с ней проходят разломы, далее веером расходящиеся в разных направлениях. В частности, цепь слабых землетрясений вытянулась от Айгулакской очаговой области вдоль восточного борта хр. Иолго (см. рис. 12, *a*).

В предыдущих исследованиях было отмечено сложное блоковое строение Чуйской очаговой области и зависимость от него сейсмической активности по площадному и объемному распределению гипоцентров [Гольдин и др., 2004а, 2004б; Арефьев и др., 2006; Еманов, Лескова, 2006; Лунина и др., 2006; Еманов и др., 2009; 2021в; 2022; Рогожин, 2019; Рогожин и др., 2021], а также по структуре напряженно-го состояния [Лескова, Еманов, 2011, 2013, 2014; Кучай, 2012; Омар и др., 2012; Сим и др., 2018].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Чуйское землетрясение 2003 г. с $M_s = 7.3$, крупнейшее сейсмическое событие в Алтае-Саянской горной области, детально исследуется сейсмологическими, геофизическими, геологическими методами, и со временем получаемые результаты вызывают все больший интерес. Это землетрясение уникально с различных позиций:

1. Очаговая область землетрясения охватывает район с ярко выраженной блочной структурой, что обеспечило сложное строение афтершокового процесса и структуры разрывов среды [Гольдин и др., 2004б; Еманов, Лескова, 2006; Арефьев и др., 2006; Рогожин, 2019; Еманов и др., 2022].

2. Сильнейший афтершоковый процесс Чуйского землетрясения (около 100 тысяч событий) и получение их детальных, высокоточных параметров позволили построить пространственную структуру активизированных разломов в очаговой области [Еманов и др., 2021в; 2022].

3. Чуйское землетрясение оказало моментальное воздействие на весь Алтай, вызвавшее угасание сейсмичности других структур и обеспечившее доминирование в регионе по уровню сейсмической энергии, выделившейся в его очаговой области, вплоть до 2008 г.

4. Спустя несколько лет активизируются смежные с очаговой областью структуры, неактивные сразу после Чуйского землетрясения [Еманов и др., 2017]. В дальнейшем наблюдается активизация структур в дальней зоне от эпицентра Чуйского землетрясения [Еманов и др., 2023а].

Эволюция в развитии сейсмичности Алтая после крупного землетрясения говорит о наличии фактов, которые можно объяснять на основе блочной модели среды с нелинейностью. Есть нерешенные вопросы, касающиеся изменения характеристик сейсмического процесса во времени. Как могут распро-

страняться (передаваться) в пространстве воздействия из одной очаговой области в другие структуры региона? Что обеспечивает накопление напряженного состояния и его разрядку с задержкой?

Отмеченные вопросы уже рассматривались в науках о Земле. Хороший обзор работ и взглядов по энергонасыщенности геологической среды представлен в работе [Пономарёв, 2008]. В соответствии с ними, геологическая среда способна преобразовывать различные виды энергии в потенциальную энергию упругих деформаций. Энергонасыщенность геологических сред в сейсмологии слабо изучена, прежде всего, по причине сложности моделей реальных сред и их разнообразия. По комплексу региональных геофизических исследований, включающих в себя ГСЗ на продольных и поперечных волнах, термометрию, данные о плотности и корреляционные зависимости связей различных параметров с физически содержательными параметрами — упругими модулями, мгновенной прочностью на сдвиг, упругой энергоёмкостью и т. п., создана методика получения разрезов земной коры в этих параметрах. Для некоторых крупных землетрясений — Верненского 1887 г., Кеминского 1911 г., Муйского 1957 г. — были построены разрезы энергоёмкости через их очаговые зоны [Крылов и др., 1993; Крылов, Тэн, 1995]. Данные комплексные исследования экспериментально доказывают существование в земной коре накопителей потенциальной энергии для разрядки ее в виде землетрясений.

Вопрос распространения в пространстве влияния крупного землетрясения на другие геологические структуры на временных отрезках размером в десятилетия, как это рассматривается в данной работе, не может быть связан с переносом вещества. Он, безусловно, обладает волновой природой. При этом выбор не богат: это могут быть упругие волны, распространяющиеся в земной коре с большими скоростями, и медленные волны. О медленных деформационных волнах, которые не регистрируются приборами ввиду предсказанной очень низкой скорости и сверхнизкой частоты, строго доказанных фактов не существует [Кузьмин, 2020]. В работе [Быков, 2005] присутствует хороший обзор публикаций по этой теме, охватывающий такое явление, как миграция землетрясений вдоль разломов и по межблочным контактам с нелинейными свойствами, но при этом медленные волны не охватывают материал блоков. Автор приходит к выводу, что на сегодняшний день нет точных представлений о скоростях медленных волн и природе их возникновения, но имеются косвенные подтверждения их существования.

Интересны также теоретические исследования для моделей блочных нелинейных сред, выполненные в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН [Макаров, 2007, 2008; Макаров, Хон, 2021; Макаров и др., 2021], осветившие автосолитонные основы сейсмического процесса в геосредах. Автосолитоны — понятие, взятое из физики нелинейных сред. Процесс генерации и распространения фронтов, бегущих деформационных автосолитонов в нелинейной среде, исследовался на основе решения системы динамических уравнений механики деформируемого твердого тела с уравнениями состояния в релаксационной форме, обеспечивающими как перегрузку прочной среды, так и релаксацию напряжений. На рассмотренных моделях сред показано, что медленная автосолитонная волна является неотъемлемой частью любого деформирования прочных сред. Доказано, что автосолитонные возмущения распространяются как в разломах, так и в межразломной среде [Макаров и др., 2021] со скоростью на 5—7 порядков ниже скорости звука.

Тектонические процессы, вызванные столкновением литосферных плит, вызывают передачу напряженного состояния в пространстве еще с меньшей скоростью. Можно понять, что передача энергии происходит, и в целом трудно установить, какой тип передачи энергии для конкретного пространственного места является вносящим наибольший вклад. Источники энергии для среды могут быть и иными, кроме передачи извне.

Для понимания изучаемого процесса влияния крупного землетрясения на сейсмичность Алтая еще раз обратимся к результатам изучения свойств энергонасыщенных сред [Пономарев, 2008]:

1. Среда обладает энергетическим потенциалом, и напряженное состояние земной коры является результатом действия нескольких причин.

2. Очаговые области землетрясений как тектонические системы занимают определенный объем, обладающий структурой, комплексом протекающих в ней процессов, и определенным образом взаимодействуют с вмещающим пространством.

3. Очаговые области эволюционируют: вначале происходит постепенный рост энергетического потенциала, затем переход системы в неравновесное состояние и, наконец, деградация системы с уменьшением энергетического состояния.

4. Предел прочности горных пород, при котором происходят землетрясения, не является постоянной величиной из-за существования процессов резкого снижения прочности горных пород или упрочнения их с переходом в хрупкое состояние.

Попробуем осмыслить некоторые факты о развитии сейсмичности в Айгулакской очаговой области после Чуйского землетрясения 2003 г.

Первый факт: слабая сейсмичность, существовавшая в Айгулакском и Курайском хребтах, сразу после Чуйского землетрясения исчезла, как и сейсмичность всего Алтая. Выделение сейсмической энер-

гии происходило только из одной очаговой области. Совершенно понятно, что никакие медленные волны, включая автосолитонные фронты деформаций, не могли так быстро оказать влияние на все очаговые области Алтая. *Наиболее вероятной причиной первого факта может быть изменение физического состояния пород под сильным воздействием сейсмических волн. Энергетический порог, при котором начинается разрушение среды, повысился.*

Второй факт: длительный период сейсмического затишья в Айгулакской очаговой области. Через шесть лет после Чуйского землетрясения наблюдается слабый рой землетрясений малых энергий, в 2012 г. происходит землетрясение с $M_L = 6.1$ с постепенным уменьшением событий в очаговой области после него, а в 2019 г. — Айгулакское землетрясение с $M_L = 5.5$, запустившее мощный афтершоковый процесс. Таким образом, в Айгулакской очаговой области после затишья сформировался длительный и сложный по энергетике и структуре сейсмический процесс, в 2019 г. существенно превысивший по выделенной сейсмической энергии очаговую область Чуйского землетрясения. *Тому могут быть две причины. Первая — накопление энергии в очаговой области за период затишья, достаточное для ее сейсмической активизации. При этом не важно, какой источник передачи энергии в очаговую область был доминирующим. И вторая — в среде понизился энергетический порог, при достижении которого начинается разрушение этого участка земной коры.*

Скорее всего, обе причины участвуют в формировании активизации Айгулакской очаговой зоны. Вопрос об изменении во времени порога напряженного состояния, при котором начинается сейсмическая активизация, не исследован до уровня практического применения. Безусловно, изучение этого вопроса является важнейшим применительно к прогнозу землетрясений.

Данная статья является продолжением серии работ о развитии сейсмичности Алтая после Чуйского землетрясения [Еманов и др., 2017, 2021в, 2022, 2023а]. В статье [Еманов и др., 2023а] выделены эволюционные изменения в сейсмичности Алтая в виде серии очаговых зон, сформировавшихся с задержкой во времени после Чуйского землетрясения как в смежных геологических структурах, так и на существенных удалениях от его эпицентральной области. В данной работе исследованы особенности сейсмической активизации в одной из очаговых зон геологической структуры, смежной с очагом Чуйского землетрясения.

ВЫВОДЫ

Айгулакская очаговая область, активизировавшаяся через шесть лет после Чуйского землетрясения 2003 г., является одной из активизаций смежных структур [Еманов и др., 2023а] в окружении его очаговой области. При этом она приурочена не к продолжению разлома, на котором произошло Чуйское землетрясение, а к субпараллельному разлому в узловой области с его разветвлением на три магистральных разлома.

Сейсмически активизирована область в виде локальной и компактной структуры размером 10×10 км с глубинами очагов от первых сотен метров до 20 км. Механизмы очагов землетрясений имеют сдвиговый характер. Детальное изучение площадной структуры активизации позволило осуществить корректировку модели ее тектонического строения.

Развитие сейсмической активности Айгулакской очаговой области во времени — длительный и сложный процесс, начавшийся как рой землетрясений малых энергий. Реально интенсивный процесс стартовал с момента землетрясения в 2012 г. с $M_L = 6.1$ с постепенным уменьшением числа землетрясений, а в 2019 г. произошло Айгулакское землетрясение с $M_L = 5.5$ с последующим сильным афтершоковым процессом. В дальнейшем сейсмический процесс изменчив во времени и динамичен в пределах площади зоны активизации.

Сейсмическая активизация Айгулакской очаговой области не укладывается в рамки стандартного афтершокового процесса после крупного землетрясения. Она является активизированной структурой с динамично изменяющимся сейсмическим режимом. Происходящие крупные землетрясения сильно разнятся по степени влияния на характеристики сейсмического процесса.

На основе детального изучения сейсмического процесса в зоне до, во время и после Айгулакского землетрясения 2019 г. установлено, что до землетрясения сейсмичность зоны имеет мозаичную структуру на карте плотности очагов; в 2019 г. произошло формирование линейной структуры в виде сейсмически активизированного разлома; в 2020 г. формируется вторая линейная структура, параллельная первой, на которой в 2021 г. сосредотачивается основная сейсмическая активность; в 2022 г. сейсмичность очаговой области снова выглядит мозаично. В целом сейсмический процесс в Айгулакской очаговой области выглядит как самоорганизующаяся область с неравновесным состоянием среды, не достигшая на данный момент максимального уровня выделения сейсмической энергии.

По плотности землетрясений малых энергий к северу от Айгулакской очаговой области прослеживается сейсмическая активность вдоль разлома, сопряженного с восточным бортом хр. Иолго. Ис-

следования его палеосейсмичности до настоящего времени не выполнялись. На разломах к западу от него в XXI в. сейсмическая активность не наблюдается; при этом на данных структурах зафиксированы следы палеоземлетрясений [Рогожин и др., 2008; Деев, 2019].

ЛИТЕРАТУРА

Арефьев С.С., Аптекман Ж.Я., Быкова В.В., Матвеев И.В., Михин А.Г., Молотков С.Г., Плетнев К.Г., Погребченко В.В. Очаг и афтершоки Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 года // Физика Земли, 2006, № 2, с. 85—96.

Бабичев А.В., Новиков И.С., Полянский О.П., Коробейников С.Н. Компьютерное моделирование деформирования земной коры Горного Алтая в кайнозое // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (2), с. 137—151.

Бондаренко П.М. Моделирование надвиговых дислокаций в складчатых областях (на примере акташских структур Горного Алтая). Новосибирск, Наука, 1976, 118 с.

Буслов М.М., Зыкин В.С., Новиков И.С., Дельво Д. Структурные и геодинамические особенности формирования Чуйской межгорной впадины Горного Алтая в кайнозое // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (12), с. 1720—1736.

Буслов М.М., Ватанабе Т., Смирнова Л.В., Фудживара И., Ивата К., де Граве И., Семанов Н.Н., Травин А.В., Кирьянова А.П., Кох Д.А. Роль сдвигов в позднепалеозойско-раннемезозойской тектонике и геодинамике Алтае-Саянской и Восточно-Казахстанской складчатых областей // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (1—2), с. 49—75.

Быков В.Г. Деформационные волны Земли: концепция наблюдения и модели // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (11), с. 1176—1190.

Ветров Е.В., Буслов М.М., де Граве И. Эволюция тектонических событий и рельефа юго-восточной части Горного Алтая в позднем мезозое—кайнозое по данным трековой термохронологии апатита // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (1), с. 125—142.

Высоцкий Е.М., Новиков И.С., Лунина О.В., Агатова А.Р., Непоп Р.К. Сейсмогенные разрывы Чуйского (Горный Алтай) землетрясения 2003 года: морфология, кинематика, пространственное распределение // Геология и геофизика, 2021, т. 62 (3), с. 348—363, doi: 10.15372/GiG2020133.

Гладышев Е.А., Еманов А.Ф., Еманов А.А., Новиков И.С., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Ершов Р.А., Полянский П.О. Сейсмическая активизация в Айгулакском хребте // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук, 2023, т. 10, № 1, с. 30—35, doi: 10.15372/FPVGN202310107.

Гольдин С.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Филина А.Г., Еманов А.А., Новиков И.С., Гибшер А.С., Высоцкий Е.М., Агатова А.Р., Дядьков П.Г., Фатеев А.В., Кашун В.Н., Подкорытова В.Г., Лескова Е.В., Янкайтис В.В., Ярыгина М.А. Чуйское (Алтайское) землетрясение 2003 года: материалы сейсмологического изучения // Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 года. Материалы предварительного изучения. М., ИФЗ РАН, 2004а, с. 55—60.

Гольдин С.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Филина А.Г., Еманов А.А., Новиков И.С., Высоцкий Е.М., Фатеев А.В., Колесников Ю.И., Подкорытова В.Г., Лескова Е.В., Ярыгина М.А. Чуйское землетрясение и его афтершоки // ДАН, 2004б, т. 395, № 4, с. 534—536.

Деев Е.В. Зоны концентрации древних и исторических землетрясений Горного Алтая // Физика Земли, 2019, № 3, с. 71—96.

Деев Е.В., Крживоблоцкая В.Е., Бородовский А.П., Энтин А.Л. Активные разломы и поверхностные разрывы позднеголоценовых землетрясений в обрамлении Кокоринской впадины (Горный Алтай, Россия) // ДАН, 2022, т. 506, № 1, с. 79—85.

Дельво Д., Тенниссен К., Ван-дер-Мейер Р., Берзин Н.А. Динамика формирования и палеостресс при образовании Чуйско-Курайской депрессии Горного Алтая: тектонический и климатический контроль // Геология и геофизика, 1995, т. 36 (10), с. 31—51.

Дергунов А.Б. Структуры сжатия и растяжения на востоке Алтая в четвертичное время // Геотектоника, 1972, № 3, с. 99—110.

Еманов А.А., Лескова Е.В. Строение эпицентральной зоны Чуйского (Горный Алтай) землетрясения по данным метода сейсмической томографии с двойными разностями // Физическая мезомеханика, 2006, т. 9, № 1, с. 45—50.

Еманов А.А., Лескова Е.В., Еманов А.Ф., Фатеев А.В. Элементы структуры и фазы развития афтершокового процесса Чуйского землетрясения // Физическая мезомеханика, 2009, т. 12, № 1, с. 29—36.

Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В. Алтайский сейсмологический полигон // Землетрясения России в 2014 году. Обнинск, ФИЦ ЕГС РАН, 2016, с. 94—98.

- 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, 2017, т. 2, № 3, с. 41—45.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Подкорытова В.Г., Шевкунова Е.В.** Алтай и Саяны // Землетрясения Северной Евразии. Обнинск, ФИЦ ЕГС РАН, 2018, вып. 21 (2012 г.), с. 132—142.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Соловьев В.М., Шевкунова Е.В., Гладышев Е.А., Антонов И.А., Корабельщиков Д.Г., Подкорытова В.Г., Янкайтис В.В., Елагин С.А., Сережников Н.А., Дураченко А.В., Артемова А.И.** Сейсмологические исследования на территории Алтае-Саянской горной области // Российский сейсмологический журнал, 2021а, т. 3, № 2, с. 20—51.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Гладышев Е.А., Антонов И.А.** Айгулакское землетрясение 13.09.2019 г. с $M = 4.7$ и его афтершоки в структуре сейсмичности Чуйско-Курайской зоны Горного Алтая // Землетрясения России в 2019 году. Обнинск, ФИЦ ЕГС РАН, 2021б, с. 117—122.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В.** Сейсмотектоника активизированной объемной структуры разломов: результаты исследования строения верхнекоровой очаговой области Чуйского землетрясения $M_S = 7.3$, произошедшего 27 сентября 2003 г. в Горном Алтае // Геотектоника, 2021в, № 2, с. 94—104.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В.** Устойчивые структуры афтершоков Чуйского землетрясения 2003 г. // Геология и геофизика, 2022, т. 63 (1), с. 87—101.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Гладышев Е.А.** Эволюция сейсмичности Алтая после Чуйского землетрясения 2003 г. // Вулканология и сейсмология, 2023а, № 5, с. 26—40.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г., Дураченко А.А., Гладышев Е.А., Ершов Р.А., Полянский П.О.** Эпицентральные зоны Чуйского 2003 г. и Айгулакского 2019 г. землетрясений // Землетрясения России в 2021 году. Обнинск, ФИЦ ЕГС РАН, 2023б, с. 133—137.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г.** Сейсмичность Алтае-Саянского региона в 2018—2019 гг. // Землетрясения Северной Евразии, 2023в, вып. 26 (2018—2019 гг.), с. 133—142, doi: 10.35540/1818-6254.2023.26.11, EDN: YMSKSE.
- Жалковский Н.Д., Кучай О.А., Мучная В.Н.** Сейсмичность и некоторые характеристики напряженного состояния земной коры Алтае-Саянской области // Геология и геофизика, 1995, т. 36 (10), с. 20—30.
- Корженков А.М., Деев Е.В., Позднякова Н.И.** Молодые формы рельефа, созданные землетрясениями в предгорьях Курайского хребта (Горный Алтай) // Вопросы инженерной сейсмологии, 2022, т. 49, № 1, с. 52—71, doi: 10.21455/VIS2022.1-4.
- Крылов С.В., Тен Е.Н.** Прочностные и упругие свойства очаговых зон сильных землетрясений на участках Байкальского и Северо-Тянь-Шаньского районов // Геология и геофизика, 1995, т. 36 (2), с. 137—150.
- Крылов С.В., Мишенькина З.Р., Кульчинский Ю.В., Тен Е.Н., Шелудько И.Ф.** Характеристика сейсмоактивной литосферы для северо-востока Байкальского региона по данным детальных работ методом ГСЗ на P - и S -волнах // Геология и геофизика, 1993, т. 34 (1), с. 110—119.
- Кузьмин Ю.О.** Современная геодинамика и медленные деформационные волны // Физика Земли, 2020, № 4, с. 172—182.
- Кучай О.А.** Особенности поля напряжений афтершоковых процессов землетрясений Алтае-Саянской горной области // Геодинамика и тектонофизика, 2012, т. 12, № 1, с. 100—111.
- Лескова Е.В., Еманов А.А.** Напряженно-деформированное состояние Чуйско-Курайской зоны (Горный Алтай) // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы Второй молодежной школы семинара. М., ИФЗ РАН, 2011, т. 1, с. 154—160.
- Лескова Е.В., Еманов А.А.** Иерархические свойства поля тектонических напряжений в очаговой области Чуйского землетрясения 2003 года // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (1), с. 113—123.
- Лескова Е.В., Еманов А.А.** Некоторые свойства иерархической модели напряженного состояния эпицентральной области Чуйского землетрясения 2003 г. // Физика Земли, 2014, № 3, с. 92—102.
- 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.
- Макаров П.В.** Эволюционная природа блочной организации геоматериалов и геосред. Универсальный критерий фрактальной делимости // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (7), с. 724—746.
- Макаров П.В.** Математическая теория эволюции нагружаемых твердых тел и сред // Физическая мезомеханика, 2008, т. 11, № 3, с. 19—35.
- Макаров П.В., Хон Ю.А.** Автосолитонная концепция сейсмического процесса. Часть 1. Обоснование возможности генерации и распространения медленных деформационных автосолитонных возмущений в геосредах // Физическая мезомеханика, 2021, т. 24, № 1, с. 5—17.

Макаров П.В., Смолин И.Ю., Хон Ю.А., Еремин М.О., Бакеев Р.А., Перышкин А.Ю. Зими-на В.А., Чирков А.О., Казакбаева А.А., Ахметов А.Ж. Автосолитонная концепция сейсмического про-цесса. Часть 2. Численные исследования генерации и распространения медленных деформационных ав-тосолитонных возмущений // Физическая мезомеханика, 2021, т. 24, № 1, с. 18—36.

Нехорошев В.П. О юном рельефе Алтая и древних долинах Казахстана // Проблемы советской геологии, 1936, т. 6, вып. 7, с. 579—581.

Новиков И.С. Роль тектоники в эволюции рельефа Горного Алтая // Геоморфология, 1998, № 1, с. 82—91.

Новиков И.С. Морфотектоника Алтая. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004, 313 с.

Новиков И.С., Высоцкий Е.М., Агатова А.Р. Типовые неотектонические структуры сжатия, сдвига и растяжения северной части Большого Алтая (Горный и Южный Алтай) // Геология и геофизи-ка, 2004, т. 45 (11), с. 1303—1312.

Новиков И.С., Еманов А.А., Лескова Е.В., Баталев В.Ю., Рыбин А.К., Баталева Е.А. Система новейших разрывных нарушения Юго-Восточного Алтая: данные об их морфологии и кинематике // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (11), с. 1139—1149.

Новиков И.С., Дядьков П.Г., Козлова М.П., Мамедов Г.М., Михеева А.В., Черкас О.В. Неотек-тоника и сейсмичность западной части Алтае-Саянской горной области, Джунгарской впадины и Китай-ского Тянь-Шаня // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (12), с. 1802—1814, doi: 10.1016/j.rgg.2014.11.008.

Обручев В.А. Алтайские этюды (этиюд второй). О тектонике Русского Алтая // Землеведение, 1915, № 3, с. 1—71.

Омар Х.М., Арефьев С.С., Ребецкий Ю.Л. Механизмы афтершоков 2004—2005 гг. Очаговой области Алтайского землетрясения 2003 г. // Геофизические исследования, 2012, т. 13, № 3, с. 56—73.

Палеосейсмология / Ред. Дж. П. Мак-Калпин. В 2-х томах. Т. 2. Перевод с англ. И.А. Басова, И.Ю. Лободенко, А.Л. Строма. М., Научный мир, 2011, 400 с.

Пономарёв В.С. Энергонасыщенность геологической среды // Труды Геологического института РАН. Вып. 582. М., Наука, 2008, 379 с.

Рогожин Е.А. Эволюция представлений о строении очагов сильных землетрясений в конце XX и начале XXI веков // Физика Земли, 2019, № 1, с. 134—148.

Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В. Сильнейшие землетрясения на юге Горного Алтая в голоцене // Физика Земли, 2008, № 6, с. 31—51.

Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Ларьков А.С. Очаг сильного землетрясения как геологический объект // Геотектоника, 2021, № 3, с. 3—30.

Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1: теоретические основы и принципы // Геодинамика и тектонофизика, 2014, т. 5, № 2, с. 445—467, doi: 10.5800/GT2014520136.

Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 2: основные этапы и перспективы // Геодинамика и тектонофизика, 2015, т. 6, № 1, с. 1—43, doi: 10.5800/GT-2015-6-1-0170.

Сим Л.А., Лескова Е.В., Кучай О.А., Еманов А.А. О проверке полевых методов реконструкции тектонических напряжений с помощью анализа механизмов афтершоковых событий Алтайского (Чуй-ского) землетрясения 2003 г. // Результаты комплексного изучения сильнейшего Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г., его место в ряду важнейших сейсмических событий XXI века на территории Рос-сии. Материалы XXI научно-практической Шукинской конференции с международным участием / Под ред. Е.А. Рогожина, Л.И. Надежка. М., ИФ РАН, 2018, с. 344—348.

Сим Л.А., Сычева Н.А., Гордеев Н.А. Неотектонические и современные напряжения юго-восточ-ного Алтая // Геофизические процессы и биосфера, 2023, № 22 (4), с. 98—110, doi: 10.21455/GPB2023.4-9.

Трифонов В.Г. Неотектоника Евразии. М., Научный мир, 1999, 252 с.

Хилько С.Д., Курушин Р.А., Кочетков В.М. Сильные землетрясения. Палеосейсмогеологиче-ские и макросейсмические данные // Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии. М., Наука, 1985, с. 19—83.

Deev E.V., Turova I.V., Borodovskiy A.P., Zolnikov I.D., Oleszczak L. Unknown large ancient earth- quakes along the Kurai fault zone (Gorny Altai): new results of palaeoseismological and archaeoseismological studies // Int. Geol. Rev., 2017, v. 59 (3), p. 293—310, doi: [10.1080/00206814.2016.1258675](https://doi.org/10.1080/00206814.2016.1258675).

Deev E., Dublyansky Yu., Kokh S., Scholz D., Rusanov G., Sokol E., Khvorov P., Reutsky V., Panin A. Large Holocene paleoseismic events and synchronized travertine formation: a case study of the Kurai fault zone (Gorny Altai, Russia) // Int. Geol. Rev., 2023, v. 65 (15), p. 2426—2446, doi: [10.1080/00206814.2022.2145510](https://doi.org/10.1080/00206814.2022.2145510).

Deev E.V., Panin A.V., Solomina O.N., Bricheva S.S., Borodovskiy A.P., Entin A.L., Kurbanov R.N. Large paleoearthquakes and Holocene faulting in the Southeastern Gorny Altai: implications for ongoing crustal shortening in Central Asia // Int. Geol. Rev., 2024, p. 1—23, doi: [10.1080/00206814.2024.2333000](https://doi.org/10.1080/00206814.2024.2333000).

Delvaux D., Cloetingh S., Beekman F., Sokoutis D., Burov E., Buslov M.M., Abdrakhmatov K.E. Basin evolution in a folding lithosphere: Altai–Sayan and Tien Shan belts in Central Asia // *Tectonophysics*, 2013, v. 602, p. 194—222, doi: [10.1016/j.tecto.2013.01.010](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.010).

Glorie S., De Grave J., Buslov M.M., Zhimulev F.I., Elburg M.A., Van Den haute P. Structural control on Meso-Cenozoic tectonic reactivation and denudation in the Siberian Altai: insights from multi-method thermochronometry // *Tectonophysics*, 2012, v. 544—545, p. 75—92, doi: [10.1016/j.tecto.2012.03.035](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.03.035).

Granö J.G. Les formes du relief dans l’Altaï russe et leur genèse: étude morphologique // *Fennia*, 1917, v. 40 (2), 125 p.

Lunina O.V., Gladkov A.S., Novikov I.S., Agatova A.R., Vysotskii E.M., Emanov A.A. Geometry of the fault zone of the 2003 $M_S = 7.5$ Chuya earthquake and associated stress fields, Gorny Altai // *Tectonophysics*, 2008, v. 453 (1—4), p. 276—294, doi: [10.1016/j.tecto.2007.10.010](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.10.010).

Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Marakhanov A.V., Ushanova E.A. Tectonic setting and geological manifestations of the 2003 Altai earthquake // *Geotectonics*, 2007, v. 41, p. 87—104, doi: [10.1134/S001685210702001X](https://doi.org/10.1134/S001685210702001X).

Turova I., Deev E., Pozdnyakova N., Entin A., Nevedrova N., Shaparenko I., Bricheva S., Korzhnikov A., Kurbanov R., Panin A. Surface-rupturing paleoearthquakes in the Kurai Fault Zone (Gorny Altai, Russia): Trenching and geophysical evidence // *J. Asian Earth Sci.*, 2020, v. 197, 104399, doi: [10.1016/j.jseas.2020.104399](https://doi.org/10.1016/j.jseas.2020.104399).