

**Научный журнал**

*Учредитель и издатель:*

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики  
Дальневосточного отделения  
Российской академии наук

Издается с января 2017 г.

**Периодичность издания 4 раза в год**

**Scientific journal**

*Founder and Publisher:*

Institute of Marine Geology and Geophysics  
of the Far Eastern Branch  
of the Russian Academy of Sciences

Published since January 2017

**Periodicity: Quarterly**

**Основная задача журнала** – информирование научной общественности, российской и зарубежной, о результатах изучения геосистем переходных зон Земли и связанных с ними проблем геофизики, геологии, геодинамики, сейсмологии, геоэкологии и других наук.

**The main objective of the journal** is informing of scientific community, Russian and foreign, about the results of researches in geosystems of the Earth's transition zones and related problems of geophysics, geology, geodynamics, seismology, geoecology and other sciences.

**Журнал:**

- индексируется в **Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)**;
- регистрируется в системе **CrossRef**. Научным публикациям присваивается идентификатор – DOI;
- включен в каталог **Ulrich's Periodicals Directory**;
- включен в международную базу научных журналов открытого доступа – **Directory of Open Access Journals (DOAJ)**;
- входит в **Перечень ВАК** – Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки: :

- 1.6.1. Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика (*геолого-минералогические*)
  - 1.6.3. Петрология, вулканология (*геолого-минералогические*)
  - 1.6.9. Геофизика (*геолого-минералогические; физико-математические*)
  - 1.6.14. Геоморфология и палеогеография (*географические*)
  - 1.6.17. Океанология (*географические; геолого-минералогические; физико-математические*)
  - 1.6.20. Геоинформатика, картография (*физико-математические*)
  - 1.6.21. Геоэкология (*географические; геолого-минералогические*)
  - 1.5.15. Экология (*биологические*)
  - 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела (*технические; физико-математические*)
- отнесен в Перечне ВАК к журналам II квартиля (K2).

**The Journal is:**

- indexed in **Russian Science Citation Index (RISC)**;
  - registered in the **CrossRef** system. Scientific publications are assigned an individual identifier DOI;
  - included in the **Ulrich's Periodicals Directory** database;
  - included in the **Directory of Open Access Journals (DOAJ)**;
  - included in the **VAK List** – the List of peer reviewed scientific journals, in which main scientific results of dissertations for the Candidate of Sciences and Doctor of Sciences degrees in the following scientific specialties and corresponding branches of science should be published:
- 1.6.1. General and regional geology. Geotectonics and geodynamics (*Geology and Mineralogy*)
  - 1.6.3. Petrology and volcanology (*Geology and Mineralogy*)
  - 1.6.9. Geophysics (*Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics*)
  - 1.6.14. Geomorphology and Paleogeography (*Geography*)
  - 1.6.17. Oceanology (*Geography; Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics*)
  - 1.6.20. Geoinformatics and cartography (*Physics and Mathematics*)
  - 1.6.21. Geoecology (*Geography; Geology and Mineralogy*)
  - 1.5.15. Ecology (*Biology*)
  - 1.1.8. Mechanics of deformable solids (*Physics and Mathematics; Engineering*)
- it is assigned to the K2 quartile in the VAK list.

*Адрес учредителя и издателя*

ИМГиГ ДВО РАН  
ул. Науки, 16, Южно-Сахалинск, 693022  
Тел./факс: (4242) 791517  
E-mail: [gtrz-journal@mail.ru](mailto:gtrz-journal@mail.ru)  
Сайт: <http://journal.imgg.ru>

*Postal address*

IMGG FEB RAS  
1B, Nauki Str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022  
Tel. / Fax: (4242) 791517  
E-mail: [gtrz-journal@mail.ru](mailto:gtrz-journal@mail.ru)  
Website: <http://journal.imgg.ru>

© ИМГиГ ДВО РАН, 2023

**Редакционная коллегия***Главный редактор*

**Завьялов Петр Олегович**, член-корреспондент РАН, д-р геогр. наук, заместитель директора, руководитель лаборатории взаимодействия океана с водами суши и антропогенных процессов, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

*Заместитель главного редактора*

**Богомолов Леонид Михайлович**, д-р физ.-мат. наук, директор, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

*Ответственный секретарь*

**Прытков Александр Сергеевич**, канд. физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

- **Адушкин Виталий Васильевич**, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, Институт динамики геосфер РАН; Московский физико-технический институт, Москва
- **Алексанин Анатолий Иванович**, д-р техн. наук, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток
- **Быков Виктор Геннадьевич**, д-р физ.-мат. наук, Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск
- **Закупин Александр Сергеевич**, канд. физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск – *зам. главного редактора*
- **Ковалев Дмитрий Петрович**, д-р физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск
- **Кочарян Геворг Грантович**, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт динамики геосфер РАН, Москва
- **Куркин Андрей Александрович**, д-р физ.-мат. наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород
- **Лабай Вячеслав Степанович**, д-р биол. наук, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск
- **Левин Владимир Алексеевич**, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток; Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
- **Лучин Владимир Александрович**, д-р геогр. наук, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток
- **Марапупец Юрий Валентинович**, д-р физ.-мат. наук, доцент, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, Паратунка
- **Огородов Станислав Анатольевич**, профессор РАН, д-р геогр. наук, чл.-корр. РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
- **Плехов Олег Анатольевич**, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
- **Разжигаяева Надежда Глебовна**, д-р геогр. наук, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток
- **Ребetsкий Юрий Леонидович**, д-р физ.-мат. наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва
- **Родкин Михаил Владимирович**, д-р физ.-мат. наук, Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва
- **Рыбин Анатолий Кузьмич**, д-р физ.-мат. наук, Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Киргизия
- **Сасорова Елена Васильевна**, д-р физ.-мат. наук, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

**Editorial Board***Editor-in-Chief*

**Peter O. Zav'yalov**, Corr. Member of the RAS, Dr. Sci. (Geography), Deputy Director, Head of the Laboratory of land-ocean interactions and the anthropogenic impact, P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow, Russia

*Deputy Editor-in-Chief*

**Leonid M. Bogomolov**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Director, Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

*Executive Secretary*

**Alexander S. Prytkov**, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk

- **Vitaly V. Adushkin**, Academician of RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Geosphere Dynamics of RAS; Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow
- **Anatoly I. Alexanin**, Dr. Sci. (Eng.), The Institute of Automation and Control Processes of the FEB RAS, Vladivostok
- **Victor G. Bykov**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Yu.A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics of the FEB RAS, Khabarovsk
- **Alexander S. Zakupin**, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk – *Deputy Editor-in-Chief*
- **Dmitry P. Kovalev**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk
- **Gevorg G. Kocharyan**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Institute of Geosphere Dynamics of RAS, Moscow
- **Andrei A. Kurkin**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod
- **Vyacheslav S. Labay**, Dr. Sci. (Biology), Sakhalin Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk
- **Vladimir A. Levin**, Academician of RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Institute of Automation and Control Processes of the FEB RAS, Vladivostok; Lomonosov Moscow State University, Moscow
- **Vladimir A. Luchin**, Dr. Sci. (Geogr.), V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the FEB RAS, Vladivostok
- **Yuri V. Marapulets**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation of the FEB RAS, Kamchatka Region
- **Stanislav A. Ogorodov**, Professor of RAS, Dr. Sci. (Geogr.), Corr. Member of RAES, Lomonosov Moscow State University, Moscow
- **Oleg A. Plekhov**, Corr. Member of RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of RAS, Perm'
- **Nadezhda G. Razjigaeva**, Dr. Sci. (Geogr.), Pacific Institute of Geography of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok
- **Yuri L. Rebetskiy**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow
- **Mikhail V. Rodkin**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of RAS, Moscow
- **Anatoly K. Rybin**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Research Station of RAS in Bishkek City, Bishkek, Kyrgyzstan
- **Elena V. Sasorova**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow

*Редакционная коллегия*

- **Сергеева Ирина Вячеславовна**, д-р биол. наук, профессор, Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, Саратов
- **Такахаши Хироаки**, профессор, Институт сейсмологии и вулканологии Университета Хоккайдо, Саппоро, Япония
- **Троицкая Юлия Игоревна**, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород; Нижегородский гос. университет им Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
- **Христофорова Надежда Константиновна**, д-р биол. наук, профессор, чл.-корр. РАЕН, Заслуженный деятель науки РФ, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток
- **Шакиров Ренат Белалович**, д-р геол.-минер. наук, доцент, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток
- **Шевченко Георгий Владимирович**, д-р физ.-мат. наук, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск
- **Шеменда Александр Ильич**, профессор исключительного класса, Университет Ниццы София-Антиполис, Ницца, Франция
- **Ярмолук Владимир Викторович**, академик РАН, д-р геол.-минер. наук, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

*Editorial Board*

- **Irina V. Sergeeva**, Dr. Sci. (Biology), Professor, Saratov State Vavilov Agrarian University, Saratov
- **Hiroaki Takahashi**, Professor, Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, Sapporo, Japan
- **Yuliya I. Troitskaya**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Institute of Applied Physics of RAS, Nizhniy Novgorod; Lobachevsky University, Nizhniy Novgorod
- **Nadezhda K. Khristoforova**, Dr. Sci. (Biology), Professor, Corr. Member of RAES, Far Eastern Federal University, Vladivostok
- **Renat B. Shakirov**, Dr. Sci. (Geol. and Miner.), Associate Professor, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the FEB RAS, Vladivostok
- **Georgiy V. Shevchenko**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Sakhalin Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk
- **Alexandre I. Chemenda (Shemenda)**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professeur des Universités de Classe Exceptionnelle, Université de Nice Sophia Antipolis, Nice, France
- **Vladimir V. Yarmolyuk**, Academician of RAS, Dr. Sci. (Geol. and Miner.), Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of RAS, Moscow

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. (Регистрационный номер ПИ № ФС 77-73243 от 13.07.2018 г.). Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

*Переводчик Качесова Галина Сергеевна*

*Редактор* к.ф.н. **Низяева Галина Филипповна**  
*Компьютерная верстка* **Филимонкина Анна Александровна**  
*Корректор* **Качесова Галина Сергеевна**  
*Дизайн* **Леоненкова Александра Викторовна**

*Адрес редакции журнала и типографии:*  
 693022, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б.  
 gtrz-journal@mail.ru

Формат 60 × 84 /8. Усл. печ. л. 13.2.  
 Тираж 150 экз. Заказ 8023. Свободная цена.  
 Дата выхода в свет 28.09.2023.

Подписной индекс в Объединенном интернет-каталоге «Пресса России» (www.pressa-rr.ru) – 80882.

По вопросам распространения обращаться также в редакцию.

*Translator Galina S. Kachesova*

*Editor* **Galina Ph. Nizyaeva**, Cand. Sci. (Phylogeny)  
*Desktop publishing* **Anna A. Filimonkina**  
*Proofreader* **Galina S. Kachesova**  
*Design* **Alexandra V. Leonenkova**

*Postal address of the Editorial Office and printing house:*  
 1B, Nauki Str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022.  
 gtrz-journal@mail.ru

Sheet size 60 × 84 /8. Conv. print. sheets 13.2.  
 Number of copies 150. Order no. 8023. Free price.  
 Date of publishing 28.09.2023.

Subscription index in the United web-catalogue "Press of Russia" (www.pressa-rr.ru) – 80882.

Please also contact the Editorial Office for distribution.

**СОДЕРЖАНИЕ**

**CONTENT**

**Геофизика. Сейсмология**

*Н.А. Сычева.* Исследование сейсмотектонических деформаций земной коры Алтае-Саянской горной области. Часть I ... 223

**Общая и региональная геология**

*М.Ф. Крутенко, В.И. Исаев, Г. Лобова.* «Палеозойская» нефть Урманского месторождения (юго-восток Западной Сибири) ... 243

**Общая и региональная геология. Океанология**

*Р.Б. Шакиров, Е.В. Мальцева, А.Л. Веникова, Н.Л. Соколова, А. И. Гресов.* Комплексные геолого-геофизические исследования по обоснованию внешней границы континентального шельфа России в Охотском и Восточно-Сибирском морях (2006–2009 гг.): обзор ... 264

**Океанология. Геоинформатика и картография**

*Г.В. Шевченко, Д.М. Ложкин.* Сезонные и межгодовые вариации температуры поверхности моря в Татарском проливе по спутниковым данным ... 276

*Т.А. Воронина, В.В. Воронин.* [Метод выбора данных для восстановления формы источника цунами] ... 292

**Механика деформируемого твердого тела**

*П.Г. Великанов, Ю.П. Артюхин.* Исследование по динамике многоэтажных зданий ... 304

**Геоэкология. Геоинформатика, картография**

**НАУЧНАЯ СМЕНА**

*М.Н. Маслова.* Количественный анализ эколого-хозяйственного баланса и структуры использования земель бассейна р. Туманная ... 316

**Geophysics. Seismology**

*N.A. Sycheva.* Study of seismotectonic deformations of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region. Part I ... 223

**General and regional geology**

*M.F. Krutenko, V.I. Isaev, G. Lobova.* The Paleozoic oil in the Urman field (the southeast of Western Siberia) ... 243

**General and regional geology. Oceanology**

*R.B. Shakirov, E.V. Maltseva, A.L. Venikova, N.L. Sokolova, A.I. Gresov.* Complex geological and geophysical studies on substantiation of the outer limits of the Russian continental shelf in the Sea of Okhotsk and East Siberian Sea (2006–2009): Review (in Engl., <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2023-3-3.pdf>) ... 264

**Oceanology. Geoinformatics and cartography**

*G.V. Shevchenko, D.M. Lozhkin.* Seasonal and interannual variations in sea surface temperature in the Tatar Strait according to satellite data (in Engl., <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2023-3-4.pdf>) ... 276

*T.A. Voronina, V.V. Voronin.* Data selection method for restoring a tsunami source form (in English) ... 292

**Mechanics of deformable solids**

*P.G. Velikanov, Y.P. Artyukhin.* Research on the dynamics of multi-storey buildings ... 304

**Geoecology. Geoinformatics and cartography**

**NEW SCIENTIFIC GENERATION**

*M.N. Maslova.* Quantitative analysis of the ecological and economic balance and the structure of land use in the basin of the Tumannaya River ... 316

© Автор 2023 г. Открытый доступ.  
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution  
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author 2023. Open access.  
Content is available under Creative Commons Attribution  
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.34

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.223-242>  
<https://www.elibrary.ru/ktttdqi>

## Исследование сейсмотектонических деформаций земной коры Алтае-Саянской горной области. Часть I

*Н. А. Сычева*

@ E-mail: [ivtran@mail.ru](mailto:ivtran@mail.ru)

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Россия*

**Резюме.** Исследованы сейсмотектонические деформации (СТД) земной коры Алтае-Саянской горной области. Расчет СТД выполнен на основе подходов, предложенных в работах Ю.В. Ризниченко и С.Л. Юнга. Оценка распределения сейсмичности, расчет среднегодовой скорости СТД (интенсивность СТД) выполнены на основе каталога землетрясений, произошедших за 1997–2020 гг. (15 669 событий). Выделены области проявления сейсмической активности и интенсивных сейсмотектонических деформаций. Высокий уровень сейсмичности и среднегодовой скорости СТД ( $10^{-7}$  год $^{-1}$ ) отмечается в областях, где произошли крупные сейсмические события (Чуйское – 27 сентября 2003 г., Тувинские – 27 декабря 2011 и 26 февраля 2012 г.). Исследование направленности СТД основано на данных о фокальных механизмах очагов землетрясений (591 событие), произошедших с 1963 по 2021 г. Для построения карты СТД использована классификация режимов СТД. По картам СТД определено направление осей укорочения, которое меняется с запада на восток от северо-западного до северо-восточного. Для исследуемой территории характерно разнообразие деформационных обстановок: сжатие, транспрессия, горизонтальный сдвиг, транстенсия, растяжение и др. На основе усредненных тензоров деформации рассчитаны и построены карты распределения коэффициента Лодэ–Надаи, угла обобщенно-плоской деформации, вертикальной компоненты. На исследуемой территории выделяются зоны, где проявляются различные режимы деформации – простое сжатие, преобладание простого сжатия, сдвиг, преобладание простого растяжения и простое растяжение. В зависимости от режима деформации отмечается как воздымание, так и опускание земной коры.

**Ключевые слова:** землетрясение, фокальный механизм, режимы СТД, удлинение и укорочение осей деформаций, интенсивность СТД, коэффициент Лодэ–Надаи, Алтае-Саянская горная область

## Study of seismotectonic deformations of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region. Part I

*Naylya A. Sycheva*

@ E-mail: [ivtran@mail.ru](mailto:ivtran@mail.ru)

*Schmidt Institute of Earth Physics of the Russian Academy of Sciences, Russia*

**Abstract.** Seismotectonic deformations (STD) of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region were studied. The STD calculation was performed on the basis of the approaches proposed in the works of Yu.V. Riznichenko and S.L. Yunga. Estimation of seismicity distribution and calculation of the average annual STD velocity (STD intensity) were made on the basis of the catalog of earthquakes that occurred in 1997–2020 (15 669 seismic events). Areas of manifestation of intense seismotectonic deformations and seismic activity are identified. A high level of seismicity and the average annual STD velocity ( $10^{-7}$  year $^{-1}$ ) is noted in the areas where strong seismic events occurred (Chuya earthquake on September 27, 2003, Tuva earthquakes on December 27, 2011 and February 26, 2012). The study of STD directionality is based on data on the focal mechanisms of earthquake sources (591 events) that occurred from 1963 to 2021. The classification of STD modes was used to construct the STD map. According to the STD maps, the direction of the shortening axes was determined, which changes from west to east from northwest to northeast. The study area is characterized by a variety of deformation conditions: compression, transpression, strike-slip, transtension, tension, etc. Based on the averaged strain tensors, the distributions of the Lode–Nadai coefficient, angle of generalized plane strain, and vertical component are calculated and plotted. The zones where various modes of deformation, such as simple compression, the predominance of simple compression, shear, the predominance of simple tension and simple tension

are manifested, are distinguished in the study area. Both uplift and subsidence of the Earth's crust are noted in the study area depending on the deformation mode.

**Keywords:** earthquake, focal mechanism, STD modes, elongation and shortening of strain axes, STD intensity, Lode–Nadai coefficient, Altai-Sayan region

**Для цитирования:** Сычева Н.А. Исследование сейсмотектонических деформаций земной коры Алтае-Саянской горной области. Часть I. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 3, с. 223–242. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.223-242>; <https://www.elibrary.ru/ktttdqi>

**For citation:** Sycheva N.A. Study of seismotectonic deformations of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region. Part I. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 3, pp. 223–242. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.223-242>; <https://www.elibrary.ru/ktttdqi>

### Финансирование

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (№ 122040600089-4).

### Funding

The work was conducted within the framework of state task of Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (no. 122040600089-4).

## Введение

Тектоническая структура Алтае-Саянской области, согласно представлениям плитной тектоники, формировалась в составе Палеоазиатского океана в течение позднего докембрия и палеозоя [1–3] вследствие его раскрытия и закрытия, т.е. полного «цикла Вильсона». Палеоазиатский океан разделил Сибирский и Северо-Китайский континенты и достиг наибольших размеров в венде – раннем кембрии [3]. В дальнейшей длительной, протекавшей в течение всего палеозоя «аккреции материала в зоне субдукции» и полного сокращения площади океанической коры сложилась современная тектоническая структура Алтае-Саянской области [1, 3–6]. Она представлена разнообразными по происхождению и возрасту структурными комплексами – фрагментами древних континентов и океанической коры, островных вулканических дуг и континентальных окраин, аккреционных и коллизионных зон, микроконтинентов и др. [4].

Алтае-Саянское нагорье – область активного горообразования, продолжающегося и в наши дни, свидетельством чему служат многочисленные сильные землетрясения современности. На рис. 1 представлено положение эпицентров крупнейших землетрясений, современных и произошедших в доинструментальный период. Крупнейшие землетрясения с магнитудой 7–8 произошли преимущественно на территории Монголии и Китая. В инструментальный период зарегистрированы и хорошо изучены с сейсмологической точки зрения Зайсанское [7], Бусингольское [8], Чуйское [9], Култукское [10], Тувинские [11], Бачатское землетрясения [12–

13]. Последнее в представленном списке относится к техногенным землетрясениям [14].

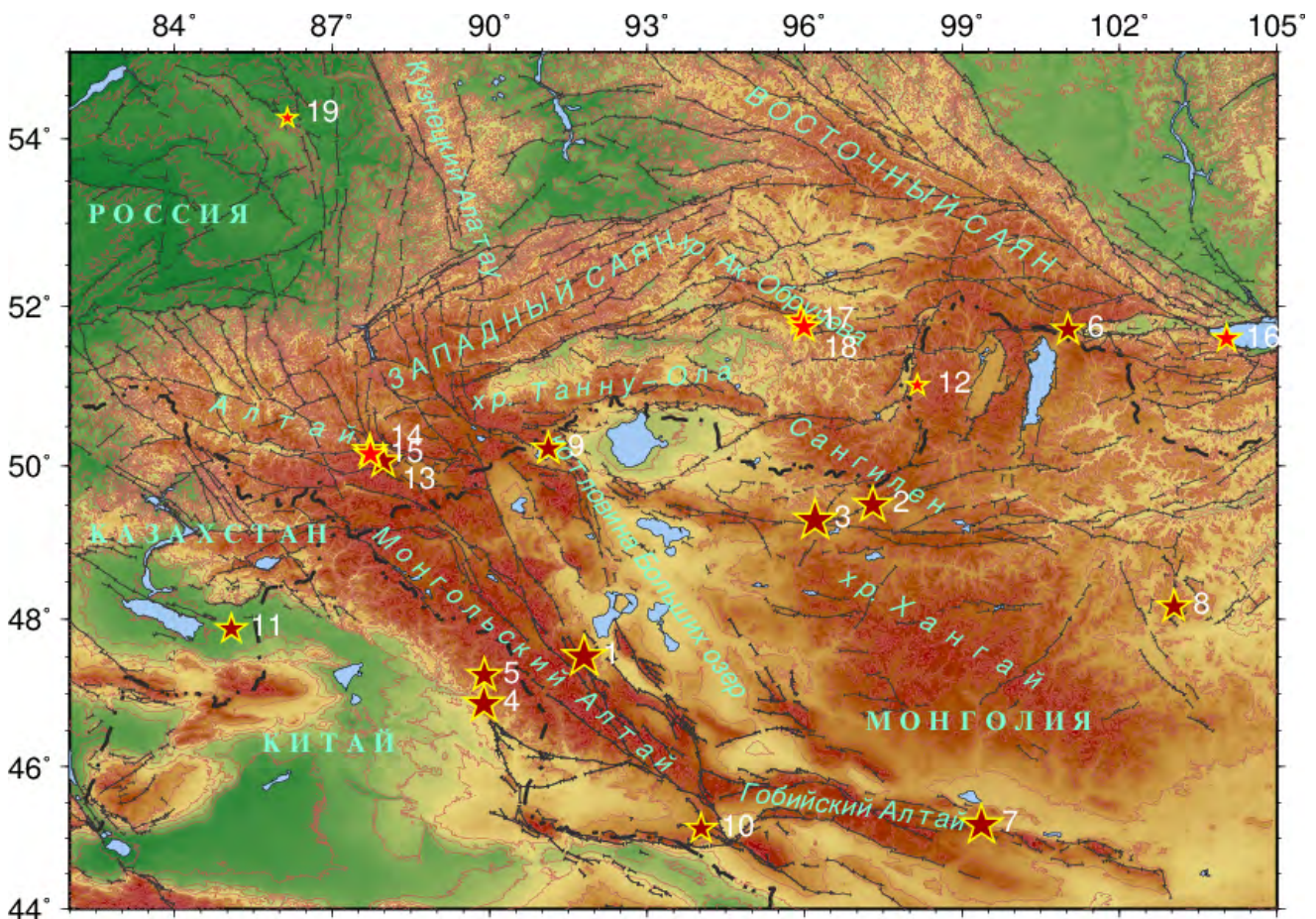
Ежегодные измерения с использованием технологий космической геодезии – метода GNSS (Global navigation satellite system) на рассматриваемой территории (рис. 1) проводятся с 2000 г. [16–19]. Измерения ведутся в рамках трех отдельных геодезических сетей: сеть Института земной коры Сибирского отделения РАН, расположенная на территории Байкальской рифтовой зоны, западной Монголии (включая Монгольский и Гобийский Алтай) и гор Тувы и Западного Саяна; сеть Научной станции РАН в г. Бишкеке, распространяющаяся от Тянь-Шаня на север до казахского Алтая, а также сеть Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (ИНГГ СО РАН), расположенная на территории российского Алтая и Западного Саяна. Современная картина смещений для территории Горного Алтая и Саян определяется несколькими эффектами – тектоническими, связанными в основном с влиянием коллизии Индийской и Евразийской плит, и быстрыми сейсмическими, связанными с сильными землетрясениями региона [2, 20–25]. В работе [26] проведена оценка тектонических составляющих современных движений, исключая влияние косейсмических смещений, в Саянском и Тувинском регионах. Решение получено относительно Евразийской плиты. В среднем по указанным регионам для периода 2000–2011 гг. получено смещение на СВВ с годовой скоростью 0.8–1.1 мм. Ошибка определения смещения может быть оценена в 0.5–0.6 мм.

Скорости вертикальных движений в Саянском регионе не превышают 5 мм/год. Анализ горизонтальных движений по сети пунктов показал смещение на СВВ области Западного Саяна и Тувы со скоростью 0.8–1.2 мм/год.

Наиболее интересные с точки зрения исследования современной геодинамики Алтая данные получены к настоящему времени в результате наблюдений на сети ИНГГ СО РАН [26]. В течение периода наблюдений на этой сети произошло сильное Чуйское землетря-

сение 27.09.2003,  $M = 7.3$ , что позволило использовать данные о скоростях движений, полученные в пунктах сети, для изучения подготовки землетрясения, косейсмической поддвижки и постсейсмической релаксации.

В целом Алтае-Саянская область находится в условиях фонового горизонтального сжатия, но, несмотря на это, на территории встречаются блоки «рифтового» или грабенового типа с близгоризонтальными максимальными удлинениями и близвертикальными мак-



**Рис. 1.** Алтае-Саянская горная область. Звездочки – эпицентры исторических и современных сильных землетрясений: темно-красные – с  $M \geq 7$ ; красные – с  $6 \leq M < 7$ . Серые линии – региональные и локальные разломы по [15]. Штрих-пунктирные линии – государственные границы. Арабские цифры – номера землетрясений: 1 – В. Монгольское, 1761,  $M = 8.3$ ; 2 – Танну-Ольское, 1905,  $M = 7.6$ ; 3 – Болнайское, 1905,  $M = 8.3$ ; 4 – Фуюньское, 1931,  $M = 7.9$ ; 5 – афтершок Фуюньского, 1931,  $M = 7.3$ ; 6 – Мондинское, 1950,  $M = 7.0$ ; 7 – Гобиалтайское, 1957,  $M = 8.1$ ; 8 – Могодское, 1967,  $M = 7.0$ ; 9 – Урег-Нурское, 1970,  $M = 7.0$ ; 10 – Тахийншарское, 1974,  $M = 6.8$ ; 11 – Зайсанское, 1990,  $M = 6.8$ ; 12 – Бусингольское, 1991,  $M = 6.4$ ; 13 – Чуйское, 2003,  $M = 7.3$ ; 14 – афтершок Чуйского, 2003,  $M = 7.0$ ; 15 – афтершок Чуйского, 2003,  $M = 6.9$ ; 16 – Култукское, 2008,  $M = 6.4$ ; 17 – Тувинское I, 2011,  $M = 6.6$ ; 18 – Тувинское II, 2012,  $M = 6.8$ ; 19 – Бачатское, 2013,  $M = 6.1$ .

**Fig. 1.** The Altai-Sayan mountain region. Asterisks are the epicenters of historical and modern strong earthquakes: dark-red – with  $M \geq 7$ ; red – with  $6 \leq M < 7$ . Gray lines are regional and local faults according to [15]. Dash-dotted lines are state borders. Arabic numerals are the earthquake numbers: 1 – the Great Mongol earthquake, 1761,  $M = 8.3$ ; 2 – the Tannu-Ola, 1905,  $M = 7.6$ ; 3 – the Bolnai, 1905,  $M = 8.3$ ; 4 – Fuyun, 1931,  $M = 7.9$ ; 5 – aftershock of the Fuyun earthquake, 1931,  $M = 7.3$ ; 6 – Mondy, 1950,  $M = 7.0$ ; 7 – Gobi-Altay, 1957,  $M = 8.1$ ; 8 – Mogod, 1967,  $M = 7.0$ ; 9 – Ureg-Nur, 1970,  $M = 7.0$ ; 10 – Takhiinshar, 1974,  $M = 6.8$ ; 11 – Zaisan, 1990,  $M = 6.8$ ; 12 – Busingol, 1991,  $M = 6.4$ ; 13 – Chuya, 2003,  $M = 7.3$ ; 14 – aftershock of the Chuya earthquake, 2003,  $M = 7.0$ ; 15 – aftershock of the Chuya earthquake, 2003,  $M = 6.9$ ; 16 – Kultuk, 2008,  $M = 6.4$ ; 17 – Tuva I, 2011,  $M = 6.6$ ; 18 – Tuva II, 2012,  $M = 6.8$ ; 19 – Bachat, 2013,  $M = 6.1$ .

симальными укорочениями, расположенные в восточной части Тоджинской котловины, на флангах озерных впадин Алаколь, Тере-Холь, Зайсан, к северо-северо-востоку от оз. Убсунур и в Чуйской степи [27]. Два крупных блока «орогенного» типа с близвертикальным удлинением и близгоризонтальным укорочением выявлены в северной части Монгольского Алтая и в пределах хр. Академика Обручева с прилегающей к нему с юга территорией. Общий характер поля деформаций очень сложен, земная кора района разбита на многочисленные, по-разному деформированные блоки. На фоне в общем мозаичного поля деформаций наиболее устойчиво прослеживаются траектории максимального укорочения. В Монгольском Алтае, частично в Горном Алтае и вблизи оз. Зайсан они ориентированы в диагональном, северо-западном направлении, а в Западном и Восточном Саянах, Туве и северной части Монголии – в северо-восточном. Видимо, такая ориентировка максимального укорочения обусловлена фоновым сжатием, которое играет определяющую роль при деформации земной коры [27–31].

В связи с актуальностью исследования напряженного состояния горных пород сейсмоактивных регионов и активных разломных структур в задаче прогноза землетрясений [32–34] важной задачей является получение данных о фокальных механизмах очагов. Не будет преувеличением отметить, что они поставляют едва ли не основную информацию о напряженном состоянии земных недр на глубинах, недоступных для непосредственного изучения.

Определенные варианты тектонофизической интерпретации механизмов очагов позволяют подойти к проблеме определения направленности современного сейсмотектонического деформационного процесса. В конце XX и в начале XXI в. для оценки напряженно-деформированного состояния земной коры активно применялся расчет сейсмотектонических деформаций [35, 36] (метод СТД). Основным приемом исследования в методе СТД являются статистические операции над матрицами, описывающими механизм очага землетрясения. В то же время геомеханический смысл расчеты приобретают в результате приложения методов механики сплошных

сред. В последние годы активно развивается и используется метод катакластического анализа разрывных смещений (МКА), разработанный в лаборатории тектонофизики Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН [37, 38]. В результате анализа совокупностей механизмов очагов землетрясений МКА позволяет не только получать данные об ориентации осей главных напряжений и о значении коэффициента Лоде–Надаи (аналогично методу СТД), но и определять относительные значения максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления (тектоническое давление, из которого вычтено давление флюида в трещинно-поровом пространстве пород).

Различие СТД и МКА состоит и в разном подходе при формировании анализируемой выборки. В первом случае она создается отбором из каталога землетрясений, попадающих в область осреднения, с определенным радиусом и с центром в узловой точке. Вклад каждого события определяется весовым коэффициентом, зависящим от магнитуды землетрясения. В дальнейшем рассматриваются те области осреднения, в которых коэффициент  $k$  (каппа, т.е. интенсивность результирующей матрицы) превышает это значение из таблицы в [35, с. 88–89], где представлены мода и критические значения параметра  $k$ , соответствующие разным кумулятивным вероятностям (90 и 95 %) и объему выборки (см. таблицу, в ней приведены некоторые данные из указанного источника). Во втором случае (МКА) расчет тензоров напряжений и приращений сейсмотектонических деформаций выполняется на основе проверки данных (фокальных механизмов) на однородность. Здесь используется критерий кумулятивности (взаимное пересечение) областей упругой разгрузки землетрясений и критерий диссипации упругой энергии для каждого землетрясения на искомом тензоре напряжений. Использование этих критериев позволяет создать однородную выборку, характеризующую квазиоднородное деформирование отвечающего ей пространственного домена. Размер такого домена, к которому относятся результаты расчета, зависит от плотности распределения землетрясений и их магнитуд. Расчет выполняется для доменов, в который попали 6 и более землетрясений [25].



**Таблица.** Мода  $M$  и критические значения параметра  $\kappa$ , соответствующие разным кумулятивным вероятностям и объему выборки ( $N$ ) [35]

**Table.** Mode  $M$  and critical values of the parameter  $\kappa$  corresponding to the different cumulative probabilities and sample size ( $N$ ) [35]

$N$	$M$	$\kappa$ 90 %	$\kappa$ 95 %
5	0.400	0.597	0.645
7	0.347	0.507	0.551
10	0.284	0.424	0.463
15	0.230	0.348	0.377
20	0.199	0.299	0.327
35	0.161	0.225	0.247
55	0.114	0.182	0.199
100	0.088	0.135	0.147
700	0.042	0.076	0.087
1000	0.031	0.050	0.053

Из различных источников (публикации, специализированные сайты и др.) нами собраны данные о фокальных механизмах 591 землетрясения Алтае-Саянской области с  $M > 2$ , которые могут быть использованы для оценки напряженно-деформированного состояния. Особенности формирования анализируемых выборок и условия небольшой плотности распределения данных определяют предпочтительность использования в данном случае метода СТД, который описан во многих работах [35, 36, 39] и остается актуальным в настоящее время [40–42].

Целью данной работы является расчет СТД Алтае-Саянской области на основе данных о фокальных механизмах землетрясений (591 событие), произошедших на этой территории с 1963 по 2021 г.

Наряду с результатами расчета СТД в работе представлены некоторые характеристики сейсмического процесса и интенсивности СТД.

### Методика и материалы

Для совокупности землетрясений, произошедших в объеме среды  $V$  за период времени  $T$ , вызванная ими усредненная неупругая деформация описывается тензором скорости разрывной (сейсмотектонической) деформации  $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$  [35, 36]:

$$\langle \varepsilon_{ij} \rangle = \frac{1}{\mu VT} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)} m_{ij}^{(\alpha)}, \quad (1)$$

где суммирование проводится по сейсмическим событиям, нумерованным с помощью индекса  $\alpha$ . В выражении (1)  $N$  – количество событий,  $M_0^{(\alpha)}$  – сейсмический момент землетрясения с номером  $\alpha$ ,  $m_{ij}^{(\alpha)}$  – направляющий тензор механизма,  $\mu$  – модуль сдвига,  $V$  – исследуемый объем и  $T$  – время исследования. В случае, когда период времени выражен в годах, тензор  $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$  также называют среднегодовым приростом сейсмотектонической деформации.

Используя предположение о подобии СТД на разных масштабных уровнях (подобии подвижек в очагах землетрясений в широком диапазоне энергий – проверка проведена в ряде работ, и, как известно, найдено подтверждение наличия подобия [43]), это выражение можно преобразовать к виду [35]

$$\langle \varepsilon_{ij} \rangle = \frac{1}{\mu VT} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)} \cdot \sum m_{ij}^{(\alpha)} = I_{\Sigma} \cdot \frac{\sum_{\alpha=1}^N w^{(\alpha)} \cdot m_{ij}^{(\alpha)}}{\sum_{\alpha=1}^N w^{(\alpha)}}, \quad (2)$$

где  $w^{(\alpha)}$  – вес отдельного события, определяемый из весовой функции  $w$ , а  $I_{\Sigma}$  определяется выражением

$$I_{\Sigma} = \frac{1}{\mu VT} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)} \quad (3)$$

и принимается за интенсивность деформации [39]. Весовая функция  $w$ , используемая для определения вклада каждого события, описана в [43].

При проведении расчетов направленности сейсмотектонической деформации посредством осреднения исходных данных геоструктурная область подразделяется на элементарные подобласти с некоторым радиусом, центры которых размещаются в узлах (узловые точки) специально выбранной сетки.

Установление в работе [35] взаимно-однозначного соответствия между множеством тензоров сейсмических моментов и трехмерной поверхностью сферы в 4D-пространстве открывает возможности эффективно использовать при изучении механизмов очагов развитые в теории классификации классические

подходы, а также обеспечивает оптимальное графическое отображение как исходных данных, так и результатов расчетов. На основе этого соответствия С.Л. Юнга предложил схему классификации режимов сейсмотектонической деформации, в которой выделяется 11 режимов. Теория, описывающая подход, на котором основана классификация режимов СТД, представлена во многих работах [35, 44], более подробно этот вопрос рассматривается в наших с соавторами публикациях [45, 46] и здесь не приводится.

Расчет СТД проводился с использованием «Автоматизированного рабочего места сейсмолога для исследования фокальных механизмов, расчета и картирования сейсмотектонических деформаций», авторское свидетельство на которое получено В.Н. Сычевым и Н.А. Сычевой в 2018 г.

*Коэффициент Лодэ–Надаи.* Согласно [45, 46], отдельные компоненты тензора средней сейсмотектонической деформации дают представление об изменении размеров ячейки осреднения в направлении координатных осей или их формы в соответствующих координатных плоскостях. Однако по этим данным достаточно трудно представить себе деформацию элементарной ячейки в целом. Обойти эту трудность позволяет использование некоторых параметров, описывающих характер деформирования в терминах теории упругости, в частности с помощью коэффициента Лодэ–Надаи. Этот коэффициент определяет вид деформации и выражается через главные значения тензора деформации  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  следующим образом [47]:

$$\mu_\varepsilon = 2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} - 1. \quad (4)$$

При  $\mu_\varepsilon = 1$  деформация имеет вид простого (одноосного) сжатия; при  $\mu_\varepsilon > 0.2$  преобладает деформация сжатия; при  $\mu_\varepsilon = -1$  имеем простое (одноосное) растяжение; при  $\mu_\varepsilon < -0.2$  растяжение преобладает, а при  $-0.2 \leq \mu_\varepsilon \leq 0.2$  имеет место простой сдвиг (чистый сдвиг). Определение главных значений тензора представляет собой классическую задачу теории упругости [48].

*Угол плоской деформации ( $\omega$ ).*  $\omega$  – угол вида напряженного состояния, имеющий тот же смысл, что и фаза тензора-девиатора  $\omega_s$ ,

по определению в [49]. Параметр  $\omega$ , как и параметр Лодэ–Надаи, в нашем случае характеризует тензор сейсмотектонической деформации (т.е. деформации, а не напряжений). Тем не менее удобно пользоваться названием «угол вида напряженного состояния», которое было введено в работах С.Л. Юнга и уже стало традиционным [35, 43]. По Юнге, угол  $\omega$  может изменяться в пределах  $0 \leq \omega \leq \pi$ . Картирование значений угла  $\omega$  позволяет уточнить расположение зон, где для СТД наиболее выражены режимы простого (одностороннего) сжатия или растяжения. В работе также рассмотрено распределение *вертикальной компоненты усредненных механизмов очагов*, которая визуалью не отражается на картах направленности СТД [44]. Значение вертикальной компоненты отражает вертикальные движения земной коры: отрицательные значения указывают на ее опускание, положительные – на воздымание.

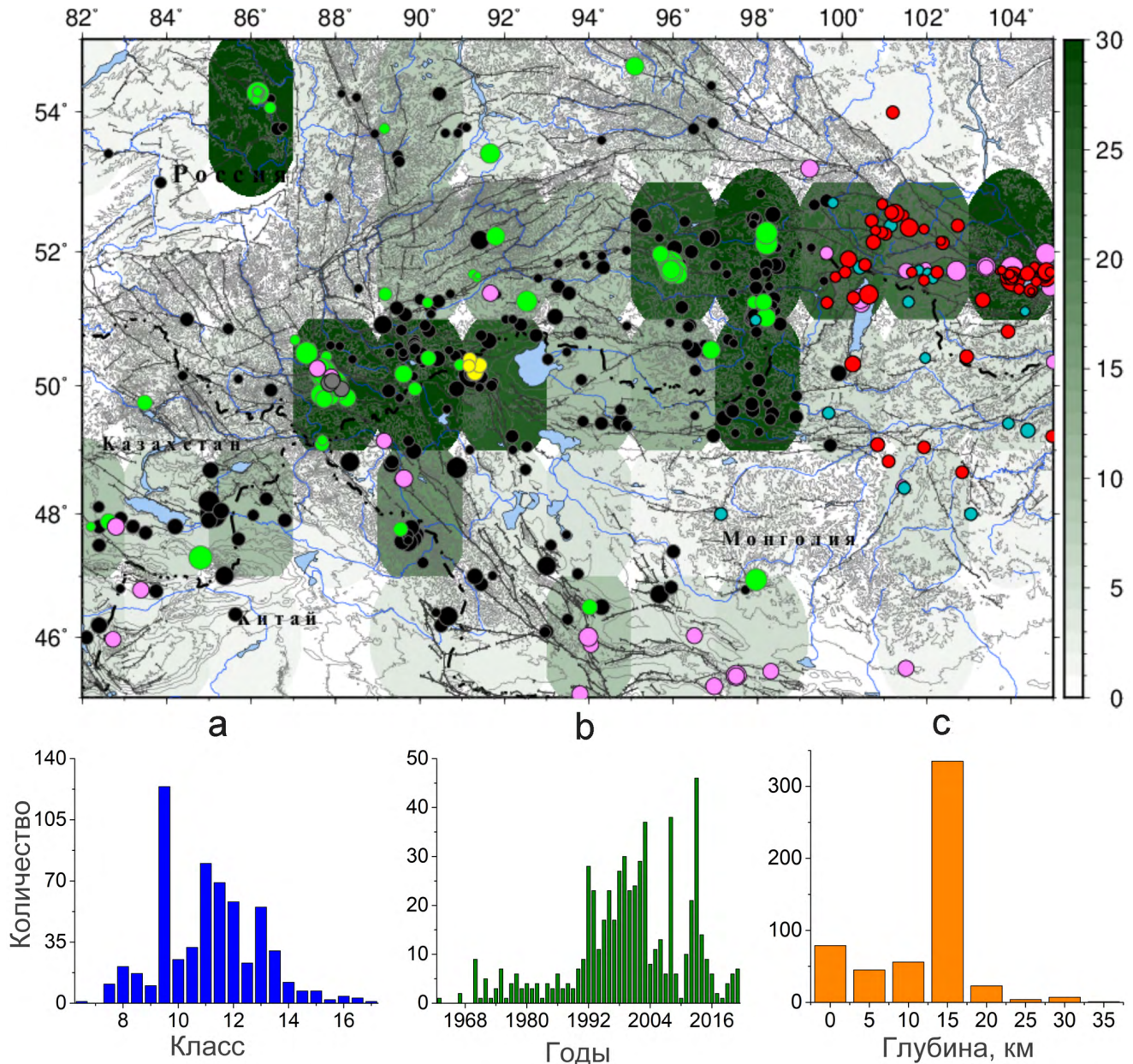
*Каталог землетрясений.* Для количественной оценки сейсмичности и интенсивности СТД использовался каталог землетрясений, сформированный нами из приложений к ежегодникам «Землетрясения Северной Евразии» (<http://www.ceme.gsras.ru/zse/>) и «Землетрясения России» (<http://www.ceme.gsras.ru/zr/>) за 1997–2020 гг. по регионам «Алтай и Саяны» и «Прибайкалье, Забайкалье» Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН) (<http://www.ceme.gsras.ru/new/catalog/>). Каталог включает 15 669 землетрясений. Ранее в работе [50] было установлено, что представительная часть каталога включает землетрясения с  $M \geq 2$ .

*Каталог фокальных механизмов* содержит данные о механизмах 591 землетрясения, произошедшего на исследуемой территории с 1963 по 2021 г. Эпицентральное положение землетрясений представлено на рис. 2. Цвет кружка обозначает принадлежность к одному источнику данных (см. подпись к рисунку). Для оценки плотности распределения землетрясений вся рассматриваемая территория разбита на ячейки размером  $2 \times 2^\circ$  (~200 × 200 км, ~58 ячеек) и определено количество событий в каждой ячейке. Землетрясения расположены в 48 ячейках (~84 % территории). Макси-

мальное количество землетрясений в ячейке составляет 71 событие (одна ячейка с центром 52° с.ш. и 98° в.д.), в 9 ячейках произошло по одному, а в остальных более одного события. Графически отображение количества земле-

трясений по ячейкам представлено фоном (см. рис. 2).

Некоторые статистические характеристики каталога фокальных механизмов представлены на рис. 2. ~25 % землетрясений имеют



**Рис. 2.** Эпицентры землетрясений из каталога фокальных механизмов (591 событие) на фоне плотности распределения событий. Цвет кружка определяет принадлежность к источнику данных: черный – ИНГГ СО РАН; зеленый – Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН; розовый – СМТ ([www.globalcmt.org/CMTsearch.html](http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html)); желтый – [51]; серый – [52]; бирюзовый – [53]; красный – Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН; синий – другие источники (5 событий). Серыми линиями отмечены региональные и локальные разломы по [15]. Штрих-пунктирные линии – государственные границы. Внизу графики, отражающие количественное распределение землетрясений из каталога фокальных механизмов: а – по классу; б – по годам; с – по глубине.

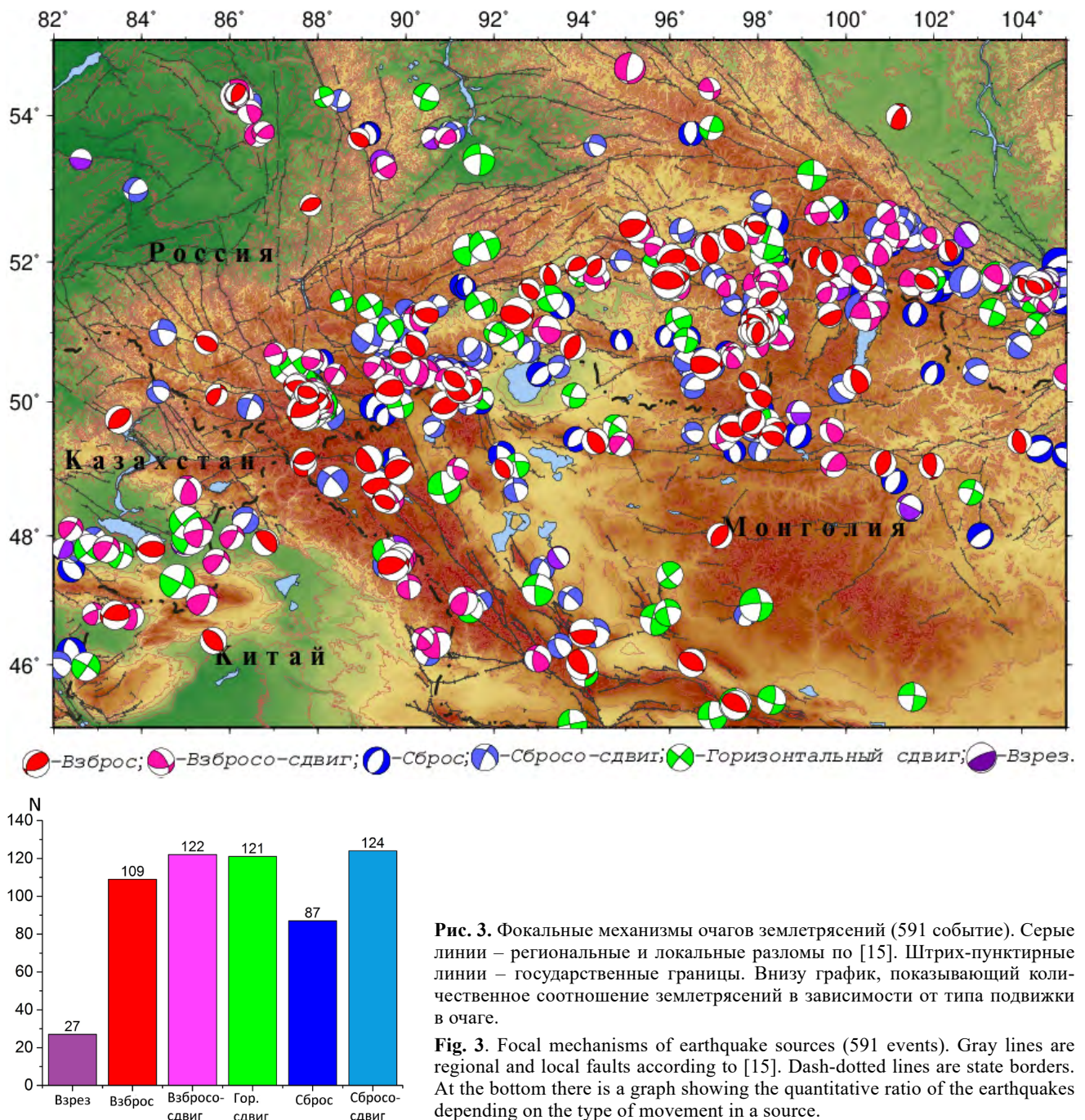
**Fig. 2.** Earthquake epicenters from the catalog of focal mechanisms (591 events) against the background of event distribution density. The color of the circle determines the belonging to the data source: black – IPGG SB RAS (Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the RAS); green – Altai-Sayan Branch of the FRC UGS RAS; pink – CMT ([www.globalcmt.org/CMTsearch.html](http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html)); yellow – [51]; gray – [52]; turquoise – [53]; red – Baikal branch of the FRC UGS RAS; blue – other sources (5 events). Gray lines are regional and local faults according to [15]. Dash-dotted lines are state borders. At the bottom there are the graphs of quantitative distribution of the earthquakes from the catalog of focal mechanisms: a – by class; b – by years; c – in depth.

класс  $K = 9.5$  ( $M = 3.25$ ). Наиболее равномерно представлен период с 1993 по 2003 г. Максимальное число событий приходится на 2013 г. 18 июня 2013 г. произошло Бачатское землетрясение с  $M_L = 6.1$  (см. рис. 1), которое сопровождалось афтершоковой активностью.

**Карта фокальных механизмов.** На рис. 3 представлена карта фокальных механизмов очагов, где цвет фокального механизма обозначает тип подвижки. Для определения типа механизма использовались значения углов погружения главных осей напряжений ( $P$  *plunge*

и  $T$  *plunge*). На рассматриваемой территории отмечается разнообразие механизмов очагов. Согласно полученным данным, ~39 % от общего числа событий составляют взбросы и взбросо-сдвиги, ~25 % – горизонтальные сдвиги и взрезы, ~36 % – сбросы и сбросо-сдвиги.

**Глубинное распределение землетрясений** представлено на интегральных проекциях на вертикальную плоскость (рис. 4). Выполнены два разреза: в направлениях запад–восток и север–юг. Эти построения позволили отметить, что в исследуемом регионе землетрясения



**Рис. 3.** Фокальные механизмы очагов землетрясений (591 событие). Серые линии – региональные и локальные разломы по [15]. Штрих-пунктирные линии – государственные границы. Внизу график, показывающий количественное соотношение землетрясений в зависимости от типа подвижки в очаге.

**Fig. 3.** Focal mechanisms of earthquake sources (591 events). Gray lines are regional and local faults according to [15]. Dash-dotted lines are state borders. At the bottom there is a graph showing the quantitative ratio of the earthquakes depending on the type of movement in a source.

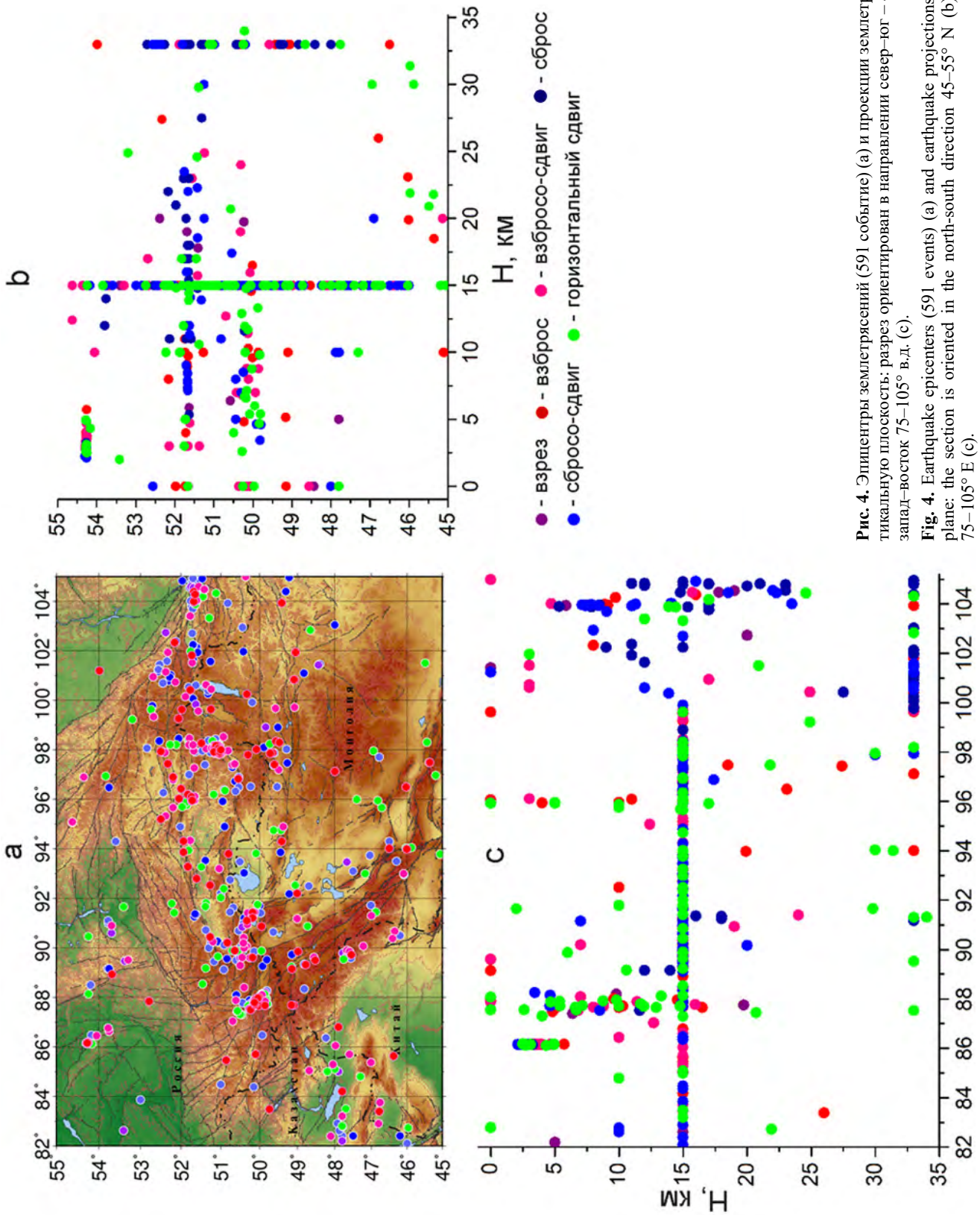


Рис. 4. Эпицентры землетрясений (591 событие) (а) и проекции землетрясений на вертикальную плоскость: разрез ориентирован в направлении север-юг – 45–55° с.ш. (b), запад-восток 75–105° в.д. (с).

Fig. 4. Earthquake epicenters (591 events) (a) and earthquake projections on the vertical plane: the section is oriented in the north-south direction 45–55° N (b), and west-east 75–105° E (c).

происходят на глубине до 35 км. 309 землетрясений из каталога имеют глубину 15 км. В работе [52], где анализируются фокальные механизмы землетрясений Алтая и Саян, отмечено, что из-за отсутствия надежного определения глубин очагов в Алтае-Саянской горной области глубина землетрясений принималась равной 15 км. Для группы землетрясений определена глубина 33 км, что может быть связано с применением годографа Джеффриса–Буллена [54]. Этот годограф используется при составлении сейсмологического бюллетеня ФИЦ ЕГС РАН. Модель Джеффриса–Буллена является одной из наиболее ранних современных моделей Земли и имеет отметку границы Мохоровичича  $h = 33$  км. Землетрясения глубже 30 км происходят на территории Монгольского и Гобийского Алтая. Результаты анализа распределения землетрясений по глубине не позволяют оценить СТД на разных глубинах, как это выполнено в работах [24, 55] при исследовании напряженного состояния эпицентральной области Чуйского землетрясения 2003 г., где отмечено изменение поля напряжений на локальном уровне в зависимости от глубины. В дальнейшем при расчете СТД будем рассматривать слой земной коры 0–35 км.

## Результаты и обсуждение

### *Количественное распределение землетрясений и интенсивность СТД*

Для исследуемой территории построены карты распределения количества землетрясений в год (позволяют определить зоны сейсмической активности) и среднегодовой скорости СТД (интенсивность СТД). Согласно выражению (3), интенсивность СТД является количественной характеристикой, это дает возможность при ее расчете использовать данные каталога землетрясений. Наиболее известным соотношением между магнитудой  $M$  и скаляр-

ным сейсмическим моментом  $M_0$  (Н·м) можно считать зависимость из [36]:  $\lg M_0 = 1.6M + 8.4$ , которую можно использовать для расчета скалярного сейсмического момента. Расчет интенсивности СТД выполняется суммированием скалярных сейсмических моментов в пределах каждой области согласно [39].

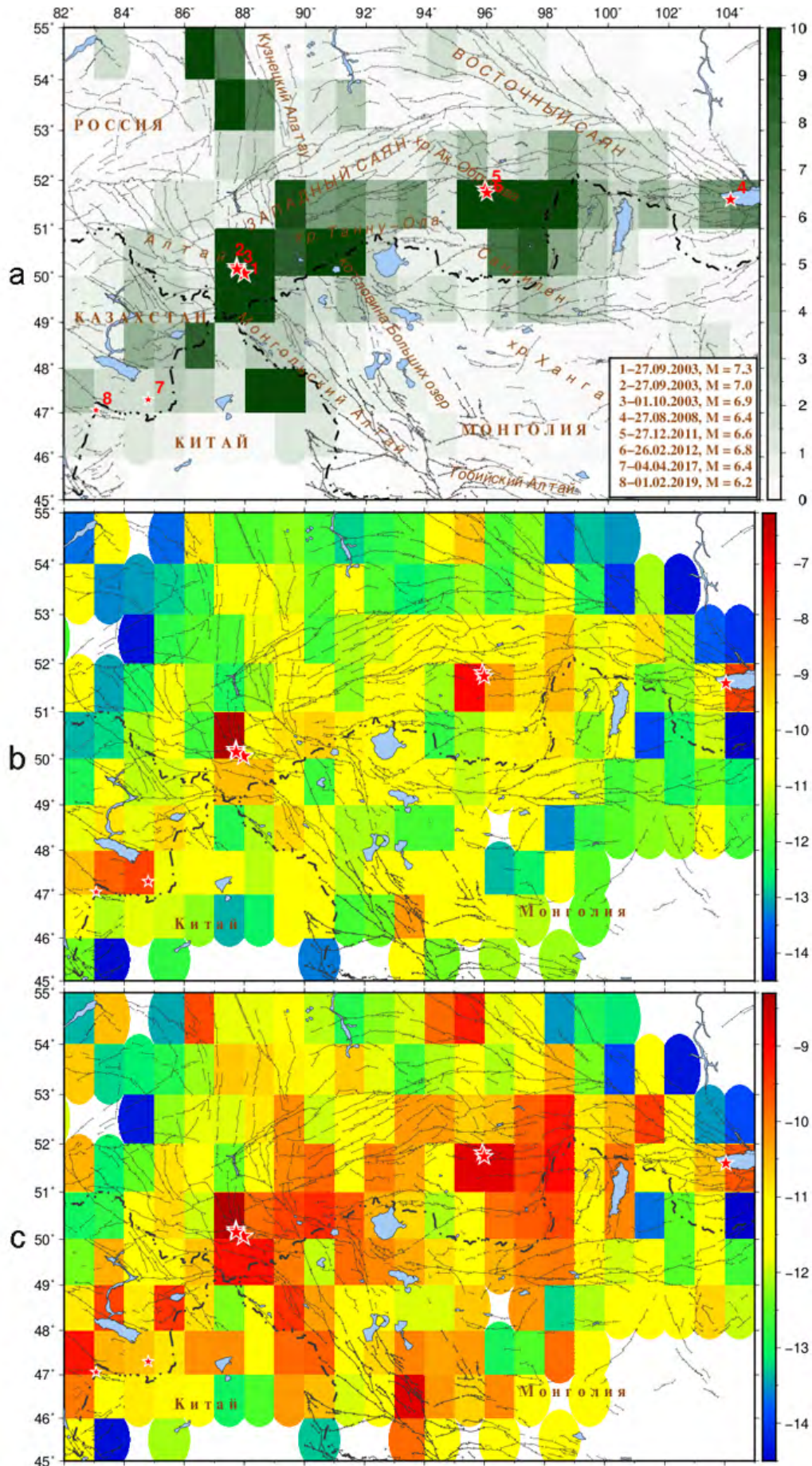
Расчет количественного распределения землетрясений и логарифма интенсивности СТД проводился в ячейках размером  $1.0 \times 1.0^\circ$  (объем данных, 15 669 событий, позволяет рассматривать территорию  $\sim 100 \times 100$  км), при этом учитывалась только представительная часть каталога землетрясений ( $2 \leq M \leq 7.3$ ), который включает события, произошедшие с 1997 по 2020 г. Результаты построений представлены на рис. 4 а.

Максимальное количество землетрясений в год (73 события) произошло в ячейке с центром  $50.5^\circ$  с.ш. и  $87.5^\circ$  в.д. (область Чуйского землетрясения 2003 г.), задание верхней границы легенды ( $N = 73$ ) привело бы к отображению только одной зоны – области Чуйского землетрясения. На эту же карту вынесены землетрясения с  $M \geq 6$  (7 событий) из рассматриваемого каталога. Четыре наиболее крупных землетрясения (Чуйское и его афтершоки, Тувинские) расположены в областях с числом землетрясений в год более 10 (Горный Алтай, хр. Академика Обручева). Высокая сейсмичность этих областей обусловлена активным афтершоковым процессом этих землетрясений.

На рис. 5 б представлено распределение логарифмических значений интенсивности СТД. Высокий уровень деформации земной коры ( $10^{-7}$  год $^{-1}$ ) отмечается в областях, где произошли сейсмические события с  $M \geq 6$  (учитываемые при расчете). Их положение также представлено на карте. Для расчета «фоновой» интенсивности СТД рассматривались землетрясения с  $2 \leq M < 6$  (рис. 5 с). На полукольце из горных хребтов Гобийского, Монгольского,

**Рис. 5.** Распределение количества землетрясений в год (а), темно-зеленым цветом отмечены ячейки с числом землетрясений в год более 10; на врезке – дата и магнитуда события. Логарифмические значения интенсивности СТД по данным каталога землетрясений (б). Логарифмические значения интенсивности СТД по представительной части каталога землетрясений (с). Серые линии – локальные и региональные разломы по [15]. Штрих-пунктирные линии – государственные границы.

**Fig. 5.** Distribution of the earthquake number per year (a), the cells with an earthquake number more than 10 are highlighted in dark-green; inset shows date and magnitude of an event. Logarithmic values of the STD intensity according to the data of earthquake catalog (b). Logarithmic values of the STD intensity according to the representative part of the earthquake catalog (c). Gray lines are local and regional faults according to [15]. Dash-dotted lines are state borders.



Российского Алтая, Восточного и Западного Саян величина интенсивности СТД находится на уровне ( $10^{-9} - 10^{-8}$  год<sup>-1</sup>).

### Параметры СТД

Расчет СТД выполняется суммированием матриц индивидуальных механизмов в пределах каждой элементарной подобласти. Выбор узловых точек осуществлен по двум сеткам: с шагом  $0.2^\circ$  (~20 км) и с шагом  $0.33^\circ$  (~33 км). В первом случае рассматривается область с радиусом  $R = 0.25^\circ$  (~25 км), во втором  $R = 0.35^\circ$  (~35 км). Первый набор параметров позволяет выделить локальные особенности, второй приводит к сглаживанию результатов.

На рис. 6 а представлена карта СТД, рассчитанная по сетке  $0.33^\circ$  (~33 км) с радиусом круговой области  $0.35^\circ$  (~35 км). Решения получены для всех узловых точек (566), где в исследуемую область попало хотя бы одно событие. Далее расчет СТД выполнялся для узловых точек, в круговой области которых 2 и более событий. Как отмечено выше, основным приемом исследования в СТД являются статистические операции над матрицами, описывающими механизм очага землетрясения. Рассмотрение 2 и более землетрясений в исследуемой области не противоречит этому подходу. Карта СТД для 152 узловых точек представлена на рис. 6 б. Для третьей части узловых точек (50 точек) решения получены по 2–5 землетрясениям, а для остальных – по 6 и более событиям. На карте представлены те области осреднения, в которых коэффициент  $k$  (интенсивность результирующей матрицы) превышает это значение из [35, с. 88–89] (см. таблицу). При расчете используется значение  $k$ , соответствующее кумулятивной вероятности 95 %.

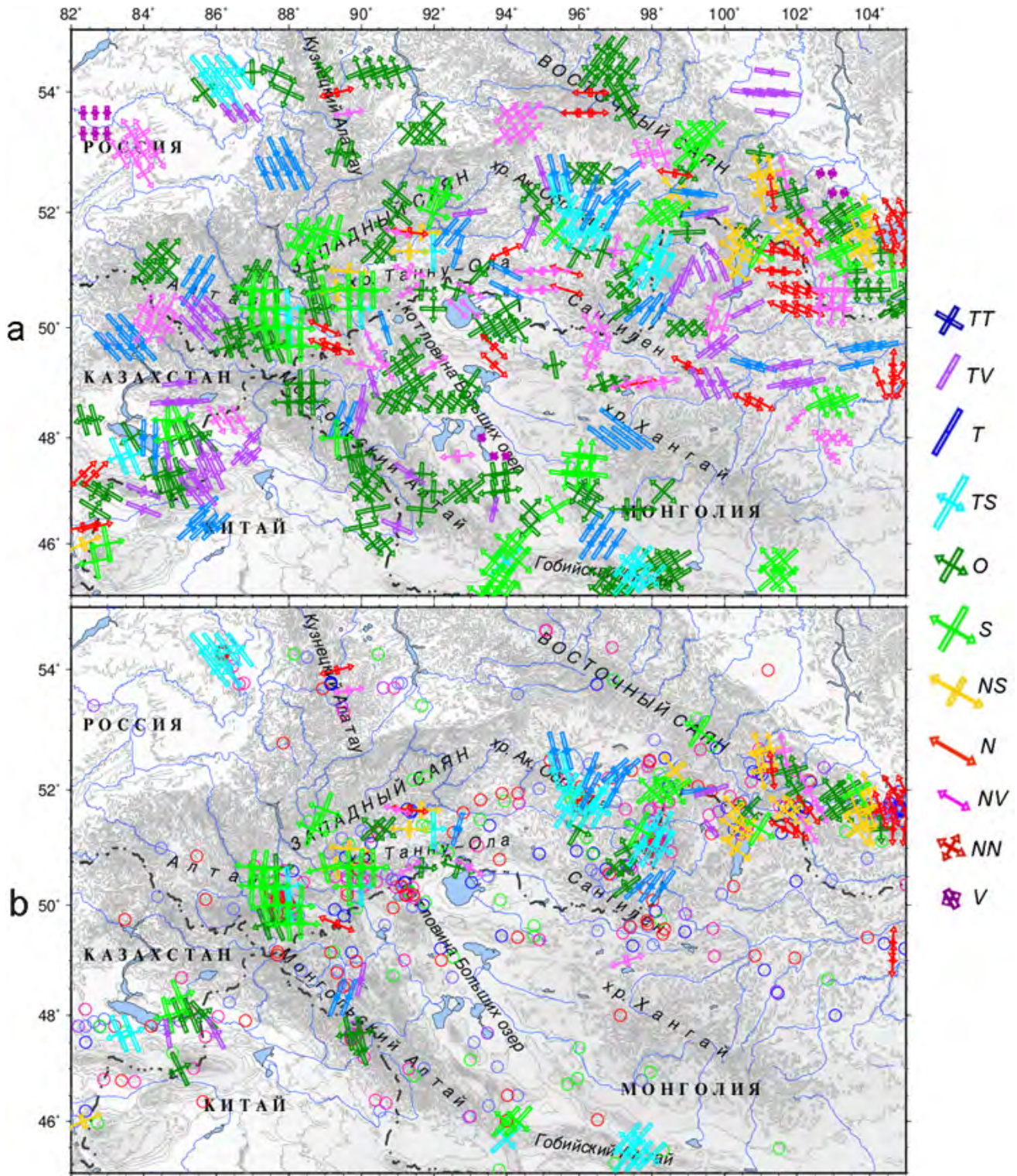
На карте (см. рис. 6 б) режимы и направленность СТД отображены для незначительной части территории Алтая и Саян, несмотря на наличие фокальных механизмов землетрясений в других частях рассматриваемой территории. В работе [52], где рассматриваются афтершоки Чуйского и Бусингольского землетрясений, отмечено, что в очаговых областях этих землетрясений могут быть сейсмические события с различающимися типами подвижки (например, взбросы и сбросы и горизон-

тальные сдвиги). При расчете СТД попадание в рассматриваемую область осреднения землетрясений с разным типом подвижки влияет на интенсивность результирующей матрицы, которая может быть ниже критического значения параметра  $k$ , и для этой области, несмотря на достаточное количество землетрясений, решение СТД может отсутствовать.

На исследуемой территории наблюдаются разнообразные режимы деформации (рис. 6 б), что указывает на сложное напряженно-деформированное состояние исследуемой территории. На Гобийском Алтае режим СТД определен для небольшой области, которая характеризуется режимом транспрессии, ось укорочения имеет северо-северо-восточное направление. На юге Монгольского Алтая проявляется режим горизонтального сдвига. Ось укорочения имеет такое же направление. Горный Алтай и западная часть хр. Тану-Ола характеризуются режимом горизонтального сдвига. Восточные склоны хр. Академика Обручева характеризует режим сжатия, а западные – режим транспрессии. В районе Терихольской впадины действует режим сжатия, который меняется на режим транспрессии в районе Бусингольской впадины и затем в Белинской впадине сменяется режимом горизонтального сдвига. В районе оз. Хубсугул проявляется режим транстенсии. В южной части Восточного Саяна наблюдаются такие режимы, как транстенсия, растяжение, переходный режим от вертикального сдвига к растяжению и режим косоугольного сдвига (см. рис. 6 б). В Южном Прибайкалье действует режим растяжения. Ось укорочения в районе Горного Алтая имеет северное направление, которое при движении на восток меняется на северо-северо-восточное в районе хр. Академика Обручева и на северо-восточное в районе южной части Восточного Саяна и Южного Прибайкалья.

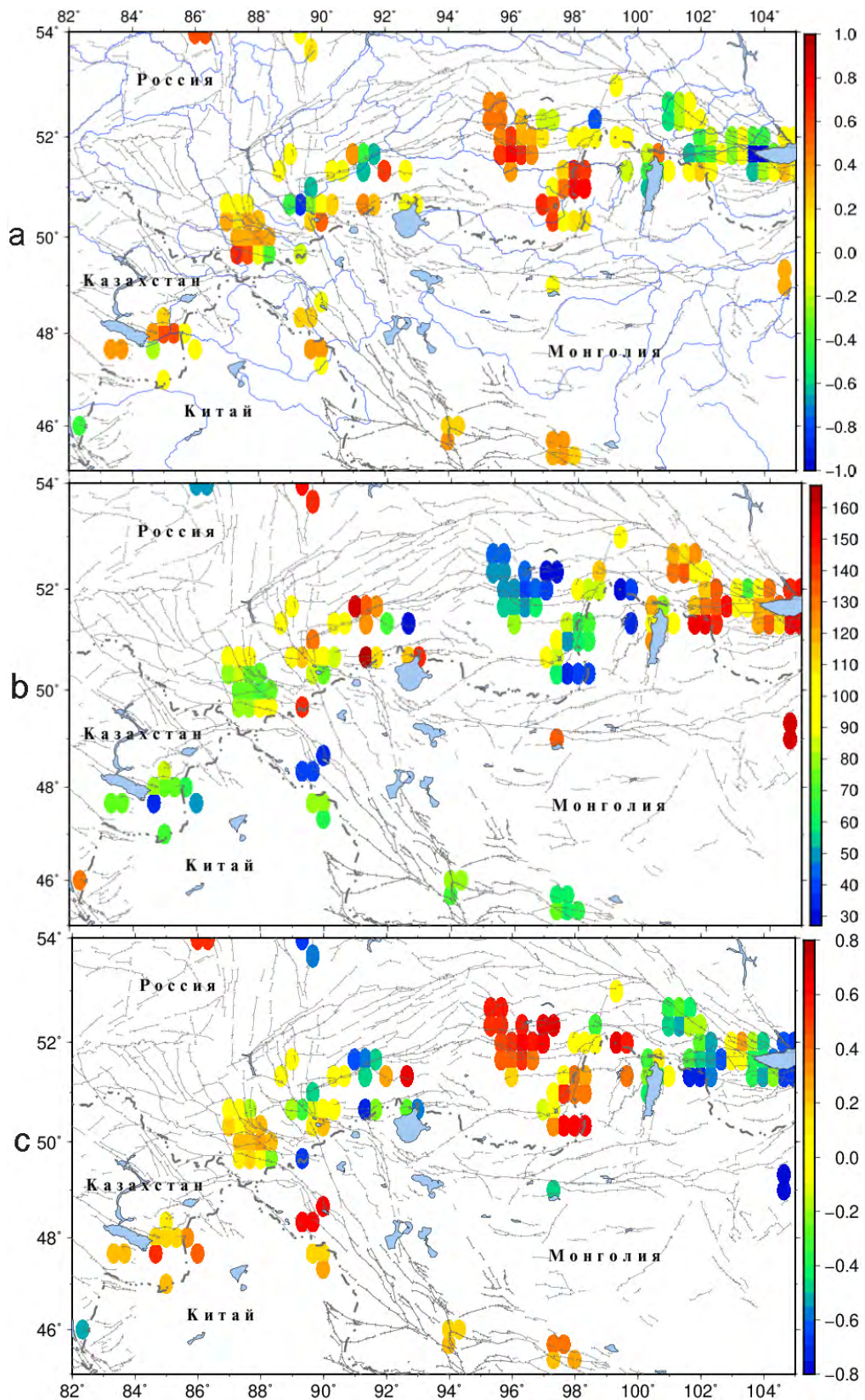
На рис. 7 представлено распределение параметров СТД (коэффициент Лоде–Надаи, угол вида обобщенно-плоской деформации (угол напряженного состояния по [35]), вертикальная компонента). Все три параметра определяются из усредненных тензоров деформации и характеризуют деформационный процесс. Коэффициент Лоде–Надаи позволяет оценить тип деформации в целом; угол  $\omega$  означает угол при-





**Рис. 6.** Карта STD, построенная по сетке с шагом  $0.33^\circ$  и с радиусом круговой области  $R = 0.35^\circ$ . Количество узловых точек – 566 (а) и 152 (б). Серые линии – локальные и региональные разломы по [15]. Штрих-пунктирные линии – государственные границы. Эпицентры землетрясений обозначены кружками (цвет окружности обозначает тип подвижки – см. рис. 4). Справа представлена классификация режимов STD по С.Л. Юнге [44]:  $T$  – сжатие;  $N$  – растяжение;  $S$  – горизонтальный сдвиг;  $V$  – вертикальный сдвиг;  $TT$  – всестороннее сжатие;  $NN$  – всестороннее растяжение;  $O$  – косой сдвиг;  $TS$  – транспрессия;  $NS$  – транстензия;  $TV$  – переходный режим от вертикального сдвига к сжатию,  $NV$  – к растяжению.

**Fig. 6.** STD map constructed on a grid with a step of  $0.33^\circ$  and with a radius of a circular area  $R = 0.35^\circ$ . The number of nodal points – 566 (a) and 152 (b). Gray lines are local and regional faults according to [15]. Dash-dotted lines are state borders. The earthquake epicenters are marked by circles (circle color indicates the type of movement – see Fig. 4). On the right is the classification of the STD modes according to S.L. Yunga [44]:  $T$  – compression;  $N$  – extension;  $S$  – strike-slip fault;  $V$  – vertical fault;  $TT$  – volume compression;  $NN$  – uniform extension;  $O$  – oblique fault;  $TS$  – transpression;  $NS$  – transtension;  $TV$  – transient regime from vertical fault to compression;  $NV$  – to extension.



**Рис. 7.** Распределение параметров СТД по исследуемой территории: а – коэффициент Лодэ–Надаи; б – угол обобщенно-плоской деформации; с – вертикальная компонента усредненных тензоров деформации. Серые линии – локальные и региональные разломы по [15]. Штрих-пунктирные линии – государственные границы.

**Fig. 7.** Distribution of the STD parameters over the study area: а – Lode–Nadai coefficient; б – angle of generalized plane strain; с – vertical component of the averaged strain tensors. Gray lines are local and regional faults according to [15]. Dash-dotted lines are state borders.

ложения сил, приводящих к деформации; вертикальная компонента тензора деформации отражает вертикальные движения земной коры.

Для Горного Алтая коэффициент Лодэ–Надаи меняется от обычных для режима простого сжатия ( $0.6 < \mu_e \leq 1$ ) к преобладанию простого сжатия ( $0.2 < \mu_e \leq 6$ ) и сдвиговой деформации ( $-0.2 < \mu_e \leq 0.2$ ). Для хр. Академика Обручева характерно простое сжатие, для системы впадин – Терехольская–Бусингольская–Белинская – преобладание простого сжатия и сдвиговые деформации. Режим простого растяжения ( $-1 \leq \mu_e < -0.6$ ) и преобладание растяжения ( $-0.6 \leq \mu_e < -0.2$ ) определен для южной части Восточного Саяна и Южного Прибайкалья. Минимальные значения угла  $\omega$  означают, что силы, приводящие к деформации, приложены в горизонтальной плоскости, и это установлено для хр. Ак. Обручева, где, судя по значениям вертикальной компоненты, происходит воздымание земной коры. Максимальные значения угла  $\omega$  характерны для южной части Восточного Саяна и Южного Прибайкалья, где имеет место опускание земной коры. Пестрая картина представленных характеристик также указывает на сложное поле деформации рассматриваемой территории и созвучна выводам, сделанным в работе [27], где отмечено, что земная кора Алтае-Саянского региона находится в состоянии горизонтального сжатия, которое в сочетании с локальными неоднородностями среды приводит к реализации разнонаправленных подвижек в очагах землетрясений и определяет блоковый, дифференцированный характер сейсмотектонических деформаций [27]. В работах [56, 57] также указано, что Алтае-Саянская складчатая область, являющаяся составной частью горной системы Центральной Азии, может рассматриваться как постоянно меняющаяся, блочная, иерархически организованная геофизическая среда. Землетрясения, регулярно происходящие в этой зоне, свидетельствуют об активно происходящем процессе разрушения земной коры и горообразования.

## Заключение

На основе сейсмических данных (каталог землетрясений, 15 669 событий, 1997–2020 гг.) и данных по фокальным механизмам очагов

землетрясений (591 событие, 1963–2022 гг.) проведен анализ напряженно-деформированного состояния земной коры Алтае-Саянской области (глубина исследования 35 км).

Высокий уровень деформации земной коры ( $10^{-7}$  год $^{-1}$ ) отмечается в тех областях, где произошли крупные сейсмические события (Чуйское – 27 сентября 2003 г., Тувинские – 27 декабря 2011 и 26 февраля 2012 г.). «Фоновая» интенсивность STD, рассчитанная по представительной части каталога, имеет уровень  $10^{-9}$  –  $10^{-8}$  год $^{-1}$  для территории, образующей полукольцо из горных хребтов Гобийского, Монгольского, Российского Алтая, Западного и Восточного Саяна.

Для оценки параметров напряженно-деформированного состояния исследуемой территории применен метод расчета STD. По картам STD определено изменение направления осей укорочения на исследуемой территории при движении с запада на восток – с северо-западного на западе до северо-восточного на востоке. На рассматриваемой территории наблюдаются все режимы деформационных обстановок (согласно классификации режимов STD по С.Л. Юнге) – сжатие, транспрессия, горизонтальный сдвиг, транстенсия, растяжение и др., что указывает на сложное поле деформации. Судя по значениям коэффициента Лодэ–Надаи, на исследуемой территории проявляются различные режимы деформации земной коры – простое сжатие, преобладание простого сжатия, сдвиг, простое растяжение и преобладание простого растяжения. Минимальные значения угла  $\omega$  наблюдаются на территории Монгольского Алтая ( $30^\circ$ ), хр. Академика Обручева ( $30$ – $40^\circ$ ), в районе Терехольской впадины, что означает преобладание усилий в горизонтальной плоскости. Максимальные значения этого параметра отмечаются в районе южной части Восточного Саяна и Южного Прибайкалья ( $100$ – $150^\circ$ ). В результате деформационных процессов воздымание земной коры испытывает территория Восточного Казахстана, Монгольский Алтай, хр. Академика Обручева и южные борты Терехольской впадины.

До настоящего времени прогноз землетрясений остается актуальной задачей для всех сейсмоактивных регионов. В работе [58] главную научную проблему видят в том, что

процесс подготовки землетрясения (тем более разные возможные его сценарии) недостаточно понят, и главную цель нового этапа мониторинговых исследований видят в получении данных в очаговых зонах, которые будут способствовать и более полному пониманию геодинамических процессов, заканчивающихся землетрясением, и построению теории физики очаговых зон.

При решении задачи прогноза землетрясений авторы многих работ [33, 59 и др.] указывают на необходимость мониторинга природного напряженного состояния, позволяющего получать данные о полном тензоре напряжений (деформаций) в земной коре и его изменениях (в частности данные о снятии напряжений в очагах землетрясений). Для дальнейшего развития и применения методов реконструкции первостепенное значение имеет наличие достаточно больших объемов данных об очаговых параметрах землетрясений. Эта работа подтверждает необходимость накопления данных об очаговых параметрах землетрясений для получения более подробной модели деформационной картины земной коры Алтае-Саянской горной области. В следующей работе мы предполагаем наиболее детально рассмотреть сейсмичность и характеристики СТД для двух областей с представительным числом данных по фокальным механизмам: Горный Алтай (область Чуйского землетрясения) и область, включающую хр. Академика Обручева, южную часть Восточного Саяна и Южное Прибайкалье.

### Список литературы

- Берзин Н.А., Колман Р.Г., Добрецов Н.Л. и др. **1994**. Геодинамическая карта западной части Палеоазиатского океана. *Геология и геофизика*, 35(7–8): 8–28.
- Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Полянский О.П. **2013**. Геодинамика, поля напряжений и условия деформаций в различных геодинамических обстановках. *Геология и геофизика*, 54(4): 469–499.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. **1990**. *Тектоника литосферных плит территории СССР*. Кн. 1. М.: Недра, 328 с.
- Берзин Н.А., Кунгурцев Л.В. **1996**. Геодинамическая интерпретация геологических комплексов Алтае-Саянской области. *Геология и геофизика*, 37(5): 63–81.
- Добрецов Н.Л. **2003**. Эволюция структур Урала, Казахстана, Тянь-Шаня и Алтае-Саянской области в Урало-Монгольском складчатом поясе (Палеоазиатский океан). *Геология и геофизика*, 44(1–2): 5–27. (На англ. яз.). EDN: PARCBJ
- Буслов М.М. **2011**. Тектоника и геодинамика Центрально-Азиатского складчатого пояса: роль позднепалеозойских крупноамплитудных сдвигов. *Геология и геофизика*, 52(1): 66–90.
- Нурмагамбетов А., Садыков А., Тимуш А.В., Хайдаров М.С., Власова А.А., Михайлова Н.Н., Сабитов М.М., Умирзакова А., Гапич В.А. **1996**. Зайсанское землетрясение 14 июня 1990 г. *Землетрясения в СССР в 1990 году*. М.: ГС РАН, с. 53–59.
- 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. и др. **2021**. Сейсмологические исследования на территории Алтае-Саянской горной области. *Российский сейсмологический журнал*, 3(2): 20–51. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.2.02>
- Лескова Е.В., Еманов А.А. **2006**. Характер деформаций в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения (27 сентября 2003 г.,  $K = 17$ , Горный Алтай) по данным анализа фокальных механизмов афтершоков. *Физическая мезомеханика*, 9(1): 51–55. EDN: IJGIRL
- Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Радзиминович Я.Б., Середкина А.И. **2010**. Култукское землетрясение 27 августа 2008 г. *Землетрясения России в 2008 году*. Обнинск: ГС РАН, с. 120.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Селезнев В.С., Фатеев А.В. **2014**. 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*, 456(2): 223–226.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г. **2014**. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатские землетрясения 2012–2013 гг.). *Землетрясения России в 2012 году*. Обнинск: ГС РАН, с. 104–108.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г. **2014**. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г.). *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, 2: 59–67. EDN: SMICZJ
- Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Будков А.М., Иванченко Г.Н. **2019**. О генезисе Бачатского землетрясения 2013 года. *Геодинамика и тектонофизика*, 10(3): 741–759. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0439>
- Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. **2017**. База данных активных разломов Евразии. *Геодинамика и тектонофизика*, 8(4): 711–736. <https://doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0314>
- Гольдин С.В., Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г. **2005**. Поля смещений земной поверхности в зоне Чуйского землетрясения, Горный Алтай. *Доклады Академии наук*, 405(6): 804–809. EDN: HSKBHV
- Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Кале Э., Дучков А.Д., Запреева Е.А., Казанцев С.А., Русбек Ф., Брюникс К. **2006**. Поля и модели смещений земной

- поверхности Горного Алтая. *Геология и геофизика*, 47(8): 923–937. EDN: NDLMOV
18. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Соловьев В.М., Шибаев С.В., Петров А.Ф., Горнов П.Ю., Шестаков Н.В., Бойко Е.В., Тимофеев А.В. **2012**. Межплитные границы Дальневосточного региона России по результатам GPS измерений, сейсморазведочных и сейсмологических данных. *Геология и геофизика*, 53(4): 489–507. EDN: OWQTPX
  19. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Бойко Е.В., Грибанова Е.И., Семибаламут В.М., Тимофеев А.В., Ярошевич А.В. **2012**. Скорости деформаций и смещения в эпоху сильного землетрясения на Южном Байкале. *Геология и геофизика*, 53(8): 1040–1061. EDN: PBVNQD
  20. Calais E., Vergnolle M., Deverchere J., San'kov V., Lukhnev A., Amariargal S. **2002**. Are post-seismic effects of the M = 8.4 Bolnay earthquake (1905 July 23) still influencing GPS velocities in the Mongolia-Baikal area. *Geophysical Journal International*, 149(1): 157–168. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2002.01624.x>
  21. Calais E., Vergnolle M., San'kov V., Lukhnev A., Miroshnitchenko A., Amarjargal S., Derverche're J. **2003**. GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994–2002): Implications for current kinematics of Asia. *Journal Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B10). <https://doi.org/10.1029/2002jb002373>
  22. Jin Sh., Park P.-H., Zhu W. **2007**. Micro-plate tectonics and kinematics in Northeast Asia inferred from a dense set of GPS observations. *Earth and Planetary Science Letters*, 257(3–4): 486–496. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.03.011>
  23. Новиков И.С., Еманов А.А., Лескова Е.В., Баталев В.Ю., Рыбин А.К., Баталева Е.А. **2008**. Система новейших разрывных нарушений Юго-Восточного Алтая: данные об их морфологии и кинематике. *Геология и геофизика*, 49(11): 1139–1149. EDN: JXFEWV
  24. Лескова Е.В., Еманов А.А. **2013**. Иерархические свойства поля тектонических напряжений в очаговой области Чуйского землетрясения 2003 года. *Геология и геофизика*, 54(1): 113–123.
  25. Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В. **2013**. Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саянской горной области. *Геология и геофизика*, 54(2): 271–291.
  26. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., Бойко Е.В., Лунев Б.В. **2014**. Поля смещений блоков Алтае-Саянского региона и эффективные реологические параметры земной коры. *Геология и геофизика*, 5(3): 481–497.
  27. Рогожин Е.А., Платонова С.Г. **2002**. *Очаговые зоны сильных землетрясений Горного Алтая в голоцене*. М.: ОИФЗ РАН, 130 с.
  28. *Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии* (под ред. В.П. Солоненко, Н.А. Флоренсова). **1985**. М.: Наука, 224 с.
  29. Хилько С.Д., Флоренсов Н.А., Курушин Р.А. и др. **1978**. Сейсмотектонические линейменты и палеосейсмодислокации Монгольского Алтая. В кн.: *Сейсмотектоника южных районов СССР*. М.: Наука, с. 75–88.
  30. Солоненко В.П. **1973**. Палеосейсмология. *Известия АН СССР. Физика Земли*, 9: 3–16.
  31. Жалковский Н.Д., Кучай О.А., Мучная В.И. **1995**. Сейсмичность и некоторые характеристики напряженного состояния земной коры Алтае-Саянской области. *Геология и геофизика*, 36(10): 20–30.
  32. Ребецкий Ю.Л. **2008**. Современное состояние теорий прогноза землетрясений. Результаты оценки природных напряжений и новая модель очага землетрясений. В кн.: *Проблемы тектонофизики: к столетию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН*. М.: ИФЗ РАН, с. 359–395.
  33. Пантелеев И.А., Наймарк О.Б. **2014**. Современные тенденции в области механики тектонических землетрясений. *Вестник Пермского научного центра УрО РАН*, 3: 44–62. EDN: TDURFP
  34. Гольдин С.В., Дядьков П.Г., Дашевский Ю.А. **2001**. Стратегия прогноза землетрясений на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне. *Геология и геофизика*, 42(10): 1484–1496.
  35. Юнга С.Л. **1990**. *Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций*. М.: Наука, 191 с.
  36. Ризниченко Ю.В. **1985**. *Проблемы сейсмологии: Избранные труды*. М.: Наука, 408 с.
  37. Ребецкий Ю.Л. **1997**. Реконструкция тектонических напряжений и сейсмотектонических деформаций: методические основы, поле современных напряжений Юго-Восточной Азии, Океании. *Доклады Академии наук*, 354(1): 101–104.
  38. Ребецкий Ю.Л. **2007**. *Тектонические напряжения и прочность горных массивов*. М.: Академкнига, 406 с.
  39. Лукк А.А., Юнга С.Л. **1979**. Сейсмотектоническая деформация Гармского района. *Известия АН СССР. Физика Земли*, 10: 24–43.
  40. Lukk A.A., Shevchenko V.I., Leonova V.G. **2015**. Autonomous geodynamics of the Pamir–Tien Shan junction zone from seismology data. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 51(6): 859–877. EDN: VALVXX
  41. Sycheva N.A., Mansurov A.N. **2017**. Comparison of crustal deformation rates estimated from seismic and GPS data on the Bishkek geodynamic polygon. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(4): 809–825. <https://doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0318>
  42. Лукк А.А., Шевченко В.И. **2019**. Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа. *Физика Земли*, 4: 99–123. doi:10.31857/S0002-33372019499-123; EDN: BMXJRQ
  43. Юнга С.Л. **2002**. *Изучение движений поверхности и деформаций земной коры на территории Центрального Тянь-Шаня, Казахской платформы и Алтая; создание программ обработки сейсмологических данных, проведение обработки: отчет о научно-исследовательской работе*. Геофизическая служба Российской академии наук. Обнинск, 41 с.

44. Юнга С.Л. **1997**. О классификации тензоров сейсмических моментов на основе их изометрического отображения на сферу. *Доклады Академии наук*, 352(2): 253–255.
45. Гущенко О.И. **1975**. Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений (по геологическим и сейсмологическим данным). *Доклады АН СССР*, 225(3): 557–560.
46. Юнга С.Л. **1979**. О механизме деформирования сейсмоактивного объема земной коры. *Известия АН СССР, Физика Земли*, 10: 14–23.
47. Христианович С.А., Шемякин Е.И. **1969**. О плоской деформации пластического материала при сложном нагружении. *Изв. АН СССР. Механика твердого тела*, 5: 138–149.
48. Филин А.П. **1975**. *Прикладная механика твердого деформируемого тела*. Т. 1. М.: Наука, 832 с.
49. Соколовский В.В. **1969**. *Теория пластичности*. М.: Высшая школа, 608 с.
50. Сычева Н.А., Сычев В.Н. **2022**. Некоторые характеристики сейсмичности Алтая и Саян. Проблемы Геокосмоса – 2022: Материалы XIV школы-конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 3–7 окт. 2022 г. СПб.: Скифия-Принт, с. 84–92.
51. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Янкайтис В.В., Филина А.Г. **2012**. Урэг-Нурское землетрясение 15.05.1970 г.,  $M_s = 7.0$  (Монгольский Алтай): афтершоковый процесс и особенности современной сейсмичности эпицентральной области. *Геология и геофизика*, 53(10): 1417–1429.
52. Kuchai O.A. **2012**. Specific features of fields of stresses associated with aftershock processes in the Altai-Sayan mountainous region. *Geodynamics & Tectonophysics*, 3(1): 59–68. (In Russ.). doi:10.5800/GT-GT-2012-3-1-0062; EDN: PBPJRR
53. Radziminovich N.A. **2021**. Focal mechanisms of earthquakes of Southern Baikal Region and Northern Mongolia. *Geodynamics & Tectonophysics*, 12(4): 902–908. (In Russ.). doi:10.5800/GT-2021-12-4-0562; EDN: VTMIGC
54. Jeffreys H., Bullen K.E. **1940**. *Seismological tables*. London: British Association for the Advancement of Science.
55. Лескова Е.В., Еманов А.А. **2014**. Некоторые свойства иерархической модели напряженного состояния эпицентральной области Чуйского землетрясения 2003 г. *Физика Земли*, 3: 92–102.
56. Гольдин С.В. **2004**. Дилатансия, переупаковка и землетрясения. *Физика Земли*, 10: 37–54. EDN: OXKDAT
57. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. **1991**. *Сейсмический процесс в блоковой среде*. М.: Наука, 96 с.
58. Гольдин С.В., Дядьков П.Г., Дашевский Ю.А. **2001**. Стратегия прогноза землетрясений на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне. *Геология и геофизика*, 42(10): 1484–1496.
59. Ребецкий Ю.Л. **2008**. Современное состояние теорий прогноза землетрясений. Результаты оценки природных напряжений и новая модель очага землетрясений. В кн.: *Проблемы тектонофизики: К сорокалетию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН*. М.: ИФЗ РАН, 359–395.

## References

- Berzin N.A., Coleman R.G., Dobretsov N.L. et al. **1994**. Geodynamic map of the western part of the Paleo-Asian ocean. *Geologiya i Geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 35: 5–22.
- Dobretsov N.L., Kulakov I.Yu., Polyansky O.P. **2013**. Geodynamics and stress-strain patterns in different tectonic settings. *Russian Geology and Geophysics*, 54(4): 357–380. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.03.001>
- Zonenshain L.P., Kuzmin M.I., Natapov L.M. **1990**. [Tectonics of lithospheric plates in the territory of the USSR]. В. 1. Moscow: Nedra, 328 p. (In Russ.).
- Berzin N.A., Kungurtsev L.V. **1996**. Geodynamic interpretation of Altai-Sayan geological complexes. *Geologiya i Geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 37(1): 56–73.
- Dobretsov N.L. **2003**. Evolution of structures of the Urals, Kazakhstan, Tien Shan and Altai-Sayan region within the Ural-Mongolian Fold Belt (Paleo-Asian ocean). *Russian Geology and Geophysics*, 44(1–2): 5–27. EDN: PARCBJ
- Buslov M.M. **2011**. Tectonics and geodynamics of the Central Asian Foldbelt: the role of Late Paleozoic large-amplitude strike-slip faults. *Russian Geology and Geophysics*, 52(1): 52–71. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.12.005>
- Nurmagambetov A., Sadykov A., Timush A.V., Khaidarov M.S., Vlasova A.A., Mikhailova N.N., Sabitov M.M., Umirzakova A., Gapich V.A. **1996**. [The Zaisan earthquake of June 14, 1990]. In: *Earthquakes in the USSR in 1990*. Moscow: GS RAS, p. 53–59. (In Russ.).
- Yemanov A.F., Yemanov 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. et al. **2021**. Seismological studies in the Altai-Sayan mountain region. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal = Russian Journal of Seismology*, 3(2): 20–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.2.02>
- Leskova E.V., Yemanov A.A. **2006**. Deformation pattern for the epicentral area of the Chuya earthquake (September 27, 2003,  $K = 17$ , Gorny Altai) according to analysis data for aftershock focal mechanisms. *Physical mesomechanics*, 9(1): 51–55. (In Russ.). EDN: IJ-GIRL
- Melnikova V.I., Gileva N.A., Radziminovich Ya.B., Seredkina A.I. **2010**. The Kultuk earthquake of August 27, 2008. In: *Earthquakes in Russia in 2008*, p. 120. (In Russ.).

11. Yemanov A.F., Yemanov A.A., Leskova E.V., Seleznev V.S., Fateev A.V. **2014**. 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. <https://doi.org/10.1134/s1028334x14050249>
12. Yemanov A.F., Yemanov A.A., Fateev A.V., Leskova E.V., Shevkunova E.V., Podkorytova V.G. **2014**. Technogenic seismicity of the Kuzbass coal mines (Bachat earthquakes in 2012–2013). In: *Earthquakes in Russia in 2012*. Obninsk: GS RAS, p. 104–108. (In Russ.).
13. Yemanov A.F., Yemanov A.A., Fateev A.V., Leskova E.V., Shevkunova E.V., Podkorytova V.G. **2014**. Mining-induced seismicity at open pit mines in Kuzbass (Bachatsky earthquake on June 18, 2013). *Journal of Mining Science*, 50(2): 224–228.
14. Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Budkov A.M., Ivanchenko G.N. **2019**. On the genesis of the 2013 Bachat earthquake. *Geodynamics & Tectonophysics*, 10(3): 741–759. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0439>; EDN: CHOELE
15. Bachmanov D.M., Kozhurin A.I., Trifonov V.G. **2017**. The active faults of Eurasia database. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(4): 711–736. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0314>; EDN: ZWRGN
16. Goldin S.V., Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G. **2005**. Fields of the Earth's surface displacement in the Chuya earthquake zone in Gornyi Altai. *Doklady Earth Sciences*, 405A(9): 1408–1413. EDN: LJKWIT
17. Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Kale E., Duchkov A.D., Zapreeva E.A., Kazantsev S.A., Rusbek F., Bryuniks K. **2006**. Displacement fields and models of current motion in Gornyi Altai. *Russian Geology and Geophysics*, 47(8): 915–929. EDN: TQNFQZ
18. Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Solov'ev V.M., Shibayev S.V., Petrov A.F., Gornov P.Yu., Shestakov N.V., Boiko E.V., Timofeev Yu.A. **2012**. Plate boundaries in the Far East region of Russia (from GPS measurement, seismic-prospecting, and seismological data). *Russian Geology and Geophysics*, 53(4): 376–391. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.03.002>
19. Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Boyko E.V., Gribanova E.I., Semibalamut V.M., Timofeev A.V., Yaroshevich A.V. **2012**. Strain and displacement rates during a large earthquake in the South Baikal region. *Russian Geology and Geophysics*, 53(8): 798–816. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.06.007>
20. Calais E., Vergnolle M., Deverchere J., San'kov V., Lukhnev A., Amariargal S. **2002**. Are post-seismic effects of the  $M = 8.4$  Bolnay earthquake (1905 July 23) still influencing GPS velocities in the Mongolia-Baikal area? *Geophysical Journal International*, 149(1): 157–168. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2002.01624.x>
21. Calais E., Vergnolle M., San'kov V., Lukhnev A., Miroshnitchenko A., Amarjargal S., Derverche're J. **2003**. GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994–2002): Implications for current kinematics of Asia. *Journal Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B10). <https://doi.org/10.1029/2002jb002373>
22. Jin Sh., Park P.-H., Zhu W. **2007**. Micro-plate tectonics and kinematics in Northeast Asia inferred from a dense set of GPS observations. *Earth and Planetary Science Letters*, 257(3-4): 486–496. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.03.011>
23. Novikov I.S., Emanov A.A., Leskova E.V., Batalev V. Yu., Rybin A.K., Bataleva E.A. **2008**. The system of neotectonic faults in Southeastern Altai: orientations and geometry of motion. *Russian Geology and Geophysics*, 49(11): 859–867. doi:10.1016/j.rgg.2008.04.005
24. Leskova E.V., Emanov A.A. **2013**. Hierarchical properties of the tectonic stress field in the source region of the 2003 Chuya earthquake. *Russian Geology and Geophysics*, 54(1): 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.12.008>
25. Rebetsky Yu.L., Kuchai O.A., Marinin A.V. **2013**. Stress state and deformations of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region. *Russian Geology and Geophysics*, 54(2): 206–222. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.01.011>
26. Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Timofeev A.V., Boyko E.V., Lunev B.V. **2014**. Block displacement fields in the Altai-Sayan region and effective rheologic parameters of the Earth's crust. *Russian Geology and Geophysics*, 55(3): 376–389. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.01.019>
27. Rogozhin E.A., Platonova S.G. **2002**. [Focal zones of strong earthquakes in Gornyi Altai in the Holocene]. Moscow: OIFZ RAN, 130 p. (In Russ.).
28. [Earthquakes and the basics of seismic zoning of Mongolia] (Eds V.P. Solonenko, N.A. Florensov). **1985**. Moscow: Nauka, 224 p. (In Russ.).
29. Khilko S.D., Florensov N.A., Kurushin R.A. et al. **1978**. [Seismotectonic lineaments and paleoseismodislocations of the Mongolian Altai]. In: *Seismotectonics of the southern regions of the USSR*. Moscow: Nauka, p. 75–88. (In Russ.).
30. Solonenko V.P. **1973**. Paleoseismology. *Izv. AN SSSR, Physics of the Solid Earth*, 9: 3–16. (In Russ.).
31. Zhalkovskiy N.D., Kuchay O.A., Muchnaya V.I. **1995**. Seismicity and some characteristics of the stressed state of the Earth's crust in the Altai-Sayan region. *Geologiya i Geofizika*, 36(10): 20–30. (In Russ.).
32. Rebetsky Yu.L. **2008**. [Current state of earthquake prediction theory. Estimation results of natural stresses and new earthquake source model]. In: *Problemy tektonofiziki: K sorokaletiyu sozdaniya M.V. Gzovskim laboratorii tektonofiziki v IFZ RAN*. Moscow: IFZ RAN, p. 359–395. (In Russ.).
33. Panteleev I.A., Naimark O.B. **2014**. Modern trends in mechanics of tectonic earthquakes. *Perm Federal Research Center J.*, 3: 44–62. (In Russ.). EDN: TDURFP
34. Goldin S.V., Dyadkov P.G., Dashevskiy Yu.A. **2001**. The South Baikal geodynamic testing ground: strategy of earthquake prediction. *Geologiya i Geofizika*, 42(10): 1484–1496. (In Russ.).

35. Yunga S.L. **1990**. [Methods and results of studying seismotectonic deformations]. Moscow: Nauka, 191 p. (In Russ.).
36. Riznichenko Yu.V. **1985**. [Problems of seismology. Selected works]. Moscow: Nauka, 408 p. (In Russ.).
37. Rebetsky Yu.L. **1997**. Reconstruction of tectonic stresses and seismotectonic strains: Methodical fundamentals, current stress field of Southeastern Asia and Oceania. *Doklady Earth Sciences*, 354(4): 560–563.
38. Rebetsky Yu.L. **2007**. *Tectonic stresses and strength of rock massifs*. M.: Akademkniga, 406 p. (In Russ.).
39. Lukk A.A., Yunga S.L. **1979**. Seismotectonic deformation of the Garm region. *Izv. AN SSSR, Fizika Zemli*, 10: 24–43. (In Russ.).
40. Lukk A.A., Shevchenko V.I., Leonova V.G. **2015**. Autonomous geodynamics of the Pamir–Tien Shan junction zone from seismology data. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 51(6): 859–877. <https://doi.org/10.1134/s1069351315040060>
41. Sycheva N.A., Mansurov A.N. **2017**. Comparison of crustal deformation rates estimated from seismic and GPS data on the Bishkek geodynamic polygon. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(4): 809–825. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0318>; EDN: ZWRGOZ
42. Lukk A.A., Shevchenko V.I. **2019**. Seismicity, tectonics, and GPS geodynamics of the Caucasus. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 55(4): 626–648. <https://doi.org/10.1134/s1069351319040062>
43. Yunga S.L. **2002**. *Study of surface movements and deformations of the earth's crust on the territory of the Central Tien Shan, the Kazakh platform and Altai; creation of seismological data processing programs, processing*: Research report. Obninsk, 41 p. (In Russ.).
44. Yunga S.L. **1997**. On the classification of seismic moment tensors based on their isometric mapping onto a sphere. *Doklady Akademii Nauk*, 352(2): 253–255. (In Russ.).
45. Gushchenko O.I. **1975**. Kinematic principle of reconstruction of directions of major stresses (from geological and seismological data). *Doklady AN SSSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 225(3): 557–560. (In Russ.).
46. Yunga S.L. **1979**. On the deformation mechanism of a seismically active crustal volume. *Izv. AN SSSR, Fizika Zemli*, 10: 14–23. (In Russ.).
47. Khristianovich S.A., Shemyakin E.I. **1969**. [On the plane strain of plastic material under complex loading]. *Izv. AN SSSR. Mechanics of Solids*, 5: 138–149. (In Russ.).
48. Filin A.P. **1975**. [Applied mechanics of solid deformable body]. Vol. 1. Moscow: Nauka, 832 p. (In Russ.).
49. Sokolovsky V.V. **1969**. *Theory of plasticity*. Moscow: Vysshaya shkola, 608 p. (In Russ.).
50. Sycheva N.A., Sychev V.N. **2022**. Some characteristics of the seismicity of Altai and Sayan. In: *Materials of the XIV school-conference with international participation "Problems of Geocosmos 2022"*, Saint Petersburg, October 3–7, 2022. St. Petersburg: Skifia-print, p. 84–92. (In Russ.).
51. Yemanov A.F., Yemanov A.A., Leskova E.V., Kolesnikov Yu.I., Yankaitis V.V., Filina A.G. **2012**. 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. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.08.009>
52. Kuchai O.A. **2012**. Specific features of fields of stresses associated with aftershock processes in the Altai-Sayan mountainous region. *Geodynamics & Tectonophysics*, 3(1): 59–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/gt-2012-3-1-0062>
53. Radziminovich N.A. **2021**. Focal mechanisms of earthquakes of Southern Baikal Region and Northern Mongolia. *Geodynamics & Tectonophysics*, 12(4): 902–908. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/gt-2021-12-4-0562>
54. Jeffreys H., Bullen K.E. **1940**. *Seismological tables*. London: British Association for the Advancement of Science.
55. Goldin S.V. **2004**. Dilatancy, repacking, and earthquakes. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 40(10): 817–832.
56. Leskova E.V., Emanov A.A. **2014**. Some properties of the hierarchical model reproducing the stress state of the epicentral area of the 2003 Chuya earthquake. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 50(3): 393–402.
57. Sadovskiy M.A., Pisarenko V.F. **1991**. [Seismic process in the block medium]. Moscow: Nauka, 96 p. (In Russ.).
58. Goldin S.V., Dyad'kov P.G., Dashevskiy Yu.A. **2001**. The South Baikal geodynamic testing ground: Strategy of earthquake prediction. *Russian Geology and Geophysics*, 42(10): 1484–1496. (In Russ.).
59. Rebetskiy Yu.L. **2008**. [Current state of earthquake prediction theory. Estimation results of natural stresses and new earthquake source model]. In: *Problemy tektonofiziki: K sorokaletiyu sozdaniya M.V. Gzovskim laboratorii tektonofiziki v IFZ RAN*. Moscow: IFZ RAN, p. 359–395. (In Russ.).

## Об авторе

**Сычева Найля Абдуллоевна** (<https://orcid.org/0000-0003-0386-3752>), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, [ivtran@mail.ru](mailto:ivtran@mail.ru)

## About the Author

**Sycheva, Naylya A.** (<https://orcid.org/0000-0003-0386-3752>), Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, [ivtran@mail.ru](mailto:ivtran@mail.ru)

Поступила 26.07.2023

Принята к публикации 18.08.2023

Received 26 July 2023

Accepted 18 August 2023