

VI МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ПРИРОДНЫЕ КАТАСТРОФЫ»

г. Южно-Сахалинск, Сахалинская область

12–16 октября 2026 г.



Ученые и специалисты, аспиранты и студенты обсудят актуальные теоретические и прикладные проблемы, которые волнуют научное сообщество не только Дальневосточного региона России. Среди этих проблем природные катастрофы, методы оценки их опасности и риска, современные технологии геофизического мониторинга в сейсмоактивных и цунамиопасных регионах а также взаимосвязи живых организмов и геосистем.

Приглашаем желающих выступить с докладами и принять участие в обсуждении.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ОБСУЖДЕНИЙ

Исследования Земли: ответ на вызовы природных и техногенных катастроф

- Геологическое строение земной коры и структур различного масштаба
- Этапы и стадии развития земной коры и верхней мантии
- Вещественный состав геологических сред и объектов
- Поиск и прогнозирование месторождений полезных ископаемых

Динамика моря и вопросы изменения климата

- Поток вещества и энергии в гидросфере
- Генерация цунами и цунамиопасность
- Моделирование и прогноз морских опасных явлений
- Геолого-геоморфологические аспекты освоения морских побережий

Живые системы и геологическая среда

- Влияние природных и антропогенных факторов на живые организмы и экосистемы
- Адаптивные стратегии живых организмов
- Биологическое разнообразие и инвазии
- Анализ состояния экосистем по данным аэрокосмических исследований

Шаг в науку: технологии и практика

- Инженерные проекты и прототипы для мониторинга природных процессов
- Цифровые методы анализа геофизических и геоэкологических данных
- Моделирование природных опасностей и их последствий
- Междисциплинарные студенческие исследования

К началу работы конференции будут изданы тезисы докладов в авторской редакции. По материалам докладов будут опубликованы тематические выпуски журнала «Геосистемы переходных зон» (БС-2, входит в Перечень ВАК).

Регистрация участников осуществляется через форму на сайте конференции.

УСЛОВИЯ УЧАСТИЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ ВЗНОС оплачивается при регистрации.

- Для аспирантов и молодых ученых до 35 лет **3500 РУБ.** • Для остальных участников конференции **5000 РУБ.** •
- Стоимость участия включает расходы на организацию мероприятий, кофе-брейки, оргнабор участника конференции •

ПРОЕЗД И ПРОЖИВАНИЕ участники конференции оплачивают самостоятельно.

Рекомендуемые гостиницы г. Южно-Сахалинска (вблизи маршрутов общественного транспорта): Lenina Hotel, Монерон, Лотос, Панорама, Командор, Юбилейная.

ПРОГРАММА будет разослана участникам, а также размещена на сайте конференции.

ЭКСКУРСИИ: осмотр достопримечательностей города Южно-Сахалинска; посещение Ботанического сада; геологическая экскурсия.

Подробная информация о сроках подачи тезисов, требованиях к их оформлению, порядке и условиях участия в конференции и экскурсионных мероприятиях будет размещена на сайте конференции и в последующих информационных письмах.

КОНТАКТЫ ОРГКОМИТЕТА

Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 1 Б
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН
Телефон/факс: 8 (4242) 79-15-17

Web-страница конференции:

<https://imggconf.ru>

E-mail: info@imggconf.ru

ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН



Дальневосточное отделение РАН



СФ ГС РАН



ФГБОУ ВО «СахГУ»



СКБ САМИ ДВО РАН



СахалинТех

САХАЛИНТЕХ САХГУ

Правительство Сахалинской области



МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ:

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН.

г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1 Б.

Проезд автобусами 10, 62, 71, 21.

Остановка — «Институт морской геологии и геофизики».

© Автор, 2026 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author, 2026.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.348

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.1.005-022>
<https://www.elibrary.ru/fkahve>

Анализ динамических параметров землетрясений Крымско-Черноморского региона. Распределение сброса напряжений

Н. А. Сычева

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

Резюме. Для Крымско-Черноморского региона из опубликованных источников собраны сведения о динамических параметрах (ДП) 261 землетрясения с $K_{\Pi} = 5.2-13.1$ (K_{Π} – класс землетрясения по Пустовитенко и Кульчицкому), которые произошли с 1990 по 2022 г.: скалярный сейсмический момент M_0 , радиус очага r , сброс касательных напряжений $\Delta\sigma$ и др. Построены распределения ДП в зависимости от магнитуды и скалярного сейсмического момента, выполнена аппроксимация распределений ДП линейной функцией, в некоторых случаях дополнительно рассматривалась степенная. Рассчитан коэффициент детерминации R^2 . Для Крымско-Черноморского региона зависимость логарифма скалярного сейсмического момента имеет вид: $\lg(M_0) = 0.87M + 11.4$ ($R^2 = 0.84$). На основе каталога землетрясений (1993–2022 гг.) построено площадное распределение среднегодовой скорости сейсмостектонических деформаций (интенсивность СТД). Проведено сравнение интенсивности СТД с уровнем сброшенных напряжений. По данным о сброшенных касательных напряжениях для Крымско-Черноморского региона построено площадное распределение средневзвешенного значения сброшенных напряжений.

Ключевые слова: землетрясение, сейсмичность, скалярный сейсмический момент, моментная магнитуда, радиус очага, сброс касательных напряжений, коэффициент детерминации, сейсмостектонические деформации, Крымско-Черноморский регион

Analysis of dynamic parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region. Stress drop distribution

Nayla A. Sycheva

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

Abstract. The information on the dynamic parameters (DP) of 261 earthquakes with $K_p = 5.2-13.1$ (K_p , earthquake class according to Pustovitenko and Kulchitsky) that occurred from 1990 to 2022 was collected for the Crimean-Black Sea region from various sources. These parameters include scalar seismic moment of M_0 , source radius r , stress drop $\Delta\sigma$, etc. The distributions of the DP depending on the magnitude and scalar seismic moment were constructed and approximated by a linear function; in some cases, a power function was additionally considered. The determination coefficient R^2 was calculated. The dependence of the logarithm of the scalar seismic moment for the Crimean-Black Sea region is $\lg(M_0) = 0.87M + 11.4$ ($R^2 = 0.84$). The areal distribution of the average annual rate of seismotectonic deformations (STD intensity) was constructed based on the earthquake catalog (1993–2022). The STD intensity was compared with the stress drop level. Based on the data on the stress drop for the Crimean-Black Sea region, the areal distribution of the weighted average of the stress drop was constructed.

Keywords: earthquake, seismicity, scalar seismic moment, moment magnitude, source radius, stress drop, coefficient of determination, seismotectonic deformations, Crimean-Black Sea region

Финансирование и благодарности

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (FMWU-2025-0036).

Автор выражает благодарность сотрудникам Института сейсмологии и геодинамики Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского (г. Симферополь), которые многие годы рассчитывают очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона, это Т.А. Пантелеева, Б.Г. Пустовитенко, Э.Э. Эреджепов, М.Н. Бондарь, И.В. Калинюк, А.А. Пустовитенко, Е.А. Мерзей, Е.И. Поречнова, З.Н. Сыкчина, В.А. Свидлова и др.

Для цитирования: Сычева Н.А. Анализ динамических параметров землетрясений Крымско-Черноморского региона. Распределение сброса напряжений. *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 1, с. 5–22. <https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.1.005-022>; <https://www.elibrary.ru/fkahve>

Funding and Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the state task of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS (FMWU-2025-0036).

The author expresses gratitude to the employees of the Institute of Seismology and Geodynamics of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky (Simferopol), who have been calculating the source parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region for many years: T.A. Panteleeva, B.G. Pustovitenko, E.E. Eredzhepov, M.N. Bondar, I.V. Kalinyuk, A.A. Pustovitenko, E.A. Merzhey, E.I. Porechnova, Z.N. Sykchina, V.A. Svidlova and others.

For citation: Sycheva N.A. Analysis of dynamic parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region. Stress drop distribution. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 1, p. 5–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.1.005-022>; <https://www.elibrary.ru/fkahve>

Введение

Черное море является одним из крупнейших замкнутых морей и существует уже 200 млн лет. Оно находится в Анатолийском секторе Альпийско-Гималайской орогенной системы и расположено между Евразийской плитой на севере и Африкано-Аравийской плитой на юге. Глобальные модели плит [1, 2] и недавние космические геодезические измерения [3, 4] указывают на то, что, двигаясь на север, Африкано-Аравийская плита сталкиваются с Евразийской плитой [5]. От этого столкновения Анатолийский блок движется на запад с полюсом вращения, расположенным примерно на севере Синайского полуострова (рис. 1). В рамках этой тектонической структуры современная тектоника Черного моря была загадкой. Система ГНСС (глобальная навигационная спутниковая система) стала чрезвычайно полезным инструментом благодаря своей способности обеспечивать высокоточную оценку континентальных и региональных деформаций [6, 7].

В геологическом отношении Черноморский бассейн делится на две части: западную и восточную, разделяет их Срединно-Черноморский хребет. Происхождение Черного моря сложно в деталях и изучается давно. Возраст

рифтогенеза для всего Черного моря предполагается как апт-альбский, но возраст рифтогенеза в восточной части Черного моря изучен меньше [9]. После закрытия Неотиса Черное море также начало закрываться в эоцен-олигоценное время. Восточное Черное море продолжало закрываться от миоцена до настоящего времени. Центральная и западная части Черного моря имеют более сложную неотектонику, обусловленную отходом Анатолийского блока, движением Африкано-Аравийской плиты на север и Эгейским растяжением.

В этом столетии в районе Черного моря отмечается сейсмическая активность от низкой до умеренной. Западная оконечность Черного моря к северу от Мраморного моря, территории Болгарии, Румынии и Украины, вероятно, подвержены влиянию тектоники растяжения в западной части Турции и Эгейском море. Существует предположение, что литосфера Черного и Каспийского морей образует устойчивый «заградительный барьер», отклоняющий мигрирующую Анатолийскую плиту на запад и направляющий континентальную литосферу восточной Турции и Кавказа вокруг восточного побережья Черного моря [10].

Горный Крым, как и Северный Кавказ, входит в число наиболее тектонически активных регионов России. Эти регионы находятся в зоне

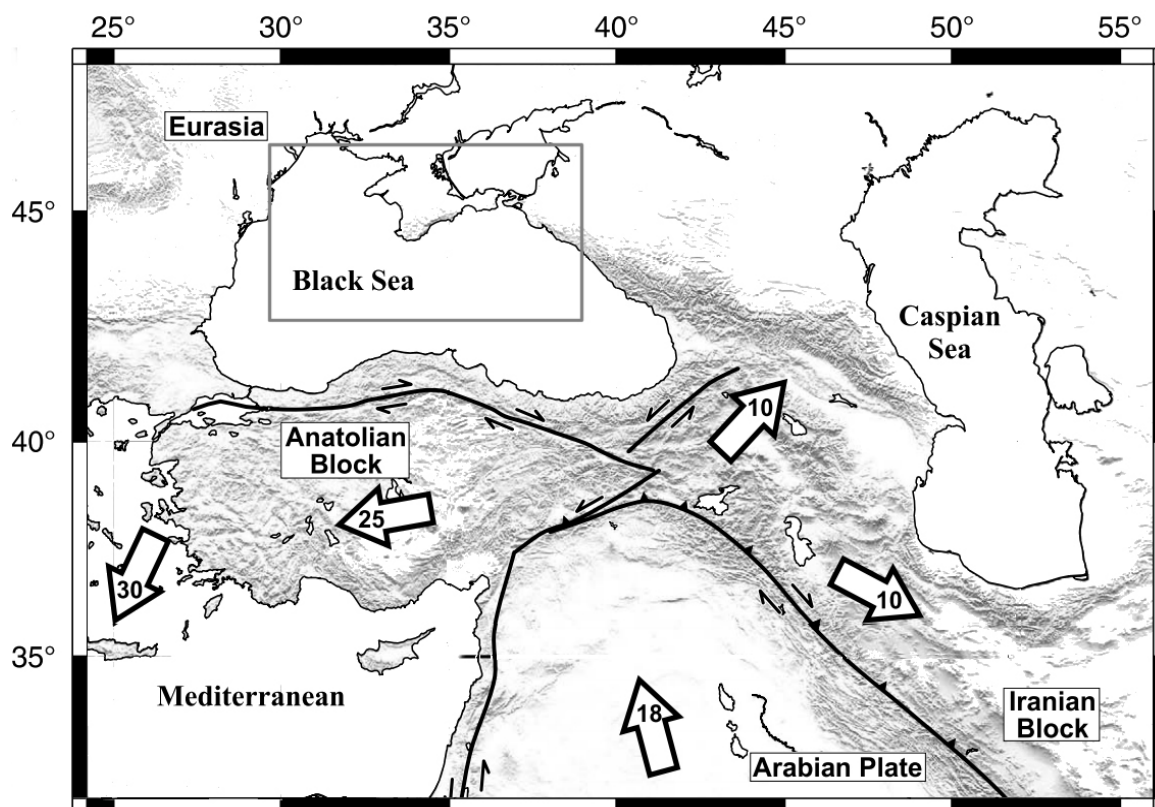


Рис. 1. Относительные движения плит в восточном Средиземноморье [8]. Пронумерованные стрелки показывают направление движения и скорость (мм/год) согласно данным GPS [8]. Серым прямоугольником отмечены условные границы Крымско-Черноморского региона.

Fig. 1. Relative plate motions in the eastern Mediterranean. (Figure from [8]). Numbered arrows show the direction of motion and velocity (mm/yr) according to the GPS data [8]. The grey rectangle marks the conditional boundaries of the Crimean-Black Sea region.

сочленения Скифской плиты и Альпийско-Гималайского складчатого пояса, их геодинамика в широком смысле обусловлена взаимодействием двух крупных литосферных плит – Евразийской и Аравийской. Геодинамические особенности Северного Кавказа обусловлены динамикой Кавказского горного сооружения и активностью Эльбрусского вулканического центра, а Крыма – динамикой системы «континентальная окраина (Горный Крым) – субокеаническая впадина (Черное море)». Крым, как и Северный Кавказ, характеризуется повышенной тектонической активностью, интенсивными современными движениями земной коры, высокой сейсмичностью и вулканизмом [11].

В работе [12] современные коллизионные процессы на северной окраине Черного моря исследовались на основе сопоставления сейсмичности с гравитационным полем и напряженно-деформированным состоянием.

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о поддвиге Восточно-Черноморской микроплиты с тонкой субокеанической корой под Скифскую платформу с толстой континентальной корой. В Южнобережной подзоне процесс поддвига осложняется вклиниванием фронтальной части коры Восточно-Черноморской микроплиты в краевую часть коры Скифской плиты.

Для сложного и неоднородного в сеймотектоническом плане Крымско-Черноморского региона ежегодное пополнение банка данных о параметрах (динамических и кинематических) очагов местных землетрясений является крайне актуальной задачей. Это необходимо в целях изучения и общего познания геодинамических процессов, протекающих в глубинной среде, где зарождаются очаги землетрясений, и возможного прогноза параметров сильных сейсмических воздействий на поверхности Земли [13].

В современных работах по прогнозу землетрясений [14–18 и др.] отмечают существенную неоднородность геологической среды. Как следствие, значения компонентов тензора природных напряжений в большой мере зависят от масштаба осреднения. В условиях мозаичности поля напряжений весьма важными для оценки состояния разломов могут быть данные о снятии напряжений в очагах землетрясений, умеренных по силе. Геомеханическим условием (предпосылкой) сильного землетрясения является недостаточная (по сравнению с обычным асейсмичным периодом) эффективность высвобождения энергии и сброса напряжений при мало- и среднемагнитудных землетрясениях. Для анализа этих и других очаговых параметров нужен большой объем данных, получение которых стало возможным лишь в последние годы.

Для землетрясений Крымско-Черноморского региона очаговые параметры на регулярной основе рассчитываются начиная с 1990 г. Отделом сейсмологии Института геофизики им. С.И. Субботина Национальной академии наук Украины (ныне это Институт сейсмологии и геодинамики, структурное подразделение Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского). Результаты расчетов опубликованы в следующих изданиях: Землетрясения Северной Евразии в 1990–2020 гг. (Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), <http://www.gsras.ru>); Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология, 2014–2022 гг. (<https://sn-geography.cfuv.ru/arhiv>).

Необходимо отметить, что в начальный период очаговые параметры землетрясений Крыма определялись только с использованием аналоговых сейсмограмм. С помощью аналоговых сейсмостанций получены количественные параметры очагов практически всех представительных землетрясений Крыма за период 1955–2006 гг., установлены их пространственно-временные закономерности, получены корреляционные зависимости от энергетического уровня землетрясений [19, 20]. В работе [20] выполнен анализ полученных очаговых пара-

метров, рассмотрено пространственное поле очаговых параметров землетрясений Крыма: механизмов, динамических параметров (ДП) и разрывов за длительный интервал времени. Сделан вывод о пространственной устойчивости особенностей очагов. С 2000 г. в Крыму была начата реорганизация системы наблюдений путем постепенной замены аналогового способа регистрации сейсмических колебаний на цифровой. В работе [21] рассмотрены динамические параметры 58 землетрясений Крыма, впервые восстановленные по спектрам региональных цифровых сейсмических записей. Получено удовлетворительное соответствие рассчитанных значений сейсмического момента и радиуса дислокации средним долгосрочным вариантам аналоговых сейсмических данных. Отмечена тенденция пространственной группировки землетрясений с завышенными и заниженными значениями параметров источника в пределах одного энергетического уровня.

Целью данной работы является сбор из различных источников и анализ данных о динамических параметрах землетрясений слабой и умеренной силы Крымско-Черноморского региона. Анализ данных включает построение распределений динамических параметров в зависимости от энергетической характеристики (магнитуда, класс) и скалярного сейсмического момента. Особый интерес представляют данные о сброшенных напряжениях. Эти данные были использованы для расчета и построения средневзвешенного значения сброшенного напряжения на территории Крымско-Черноморского региона, а также для определения связи между интенсивностью сеймотектонической деформации и уровнем сброса напряжений.

Исходные данные и методы

В качестве исходных данных рассмотрены динамические параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона из указанных выше источников, где представлены: сейсмический момент, M_0 ; радиус круговой дислокации, r_0 ; сброшенное напряжение, $\Delta\sigma$; кажущееся напряжение, $\eta\sigma$; радиационное трение, $\Delta\sigma_r$; деформация сдвига, ε ; средняя подвижка по разрыву, \bar{U} ; энергия образования

дислокации в очаге, E_U . Для определения этих параметров использовались количественные связи между теоретическими моделями источников и основными характеристиками амплитудных спектров объемных волн [22] и теоретическая дислокационная модель Брюна [23, 24], в рамках которой удовлетворительно аппроксимируются экспериментальные амплитудные спектры записей землетрясений Крыма [25]. Методика интерпретации спектров с применением данной модели и формулы расчета динамических параметров очага по низкочастотному уровню спектра Ω_0 и угловой частоте f_0 приведены в работах [25–27]. Методика оцифровки и расчета спектральных и очаговых параметров при работе с аналоговыми сейсмограммами описана в [25]. При расчете динамических параметров очагов по спектрам записи поперечной S -волны использован полный вектор колебаний по составляющим N–S и E–W,

а по продольной P -волне – спектр записи вертикальной составляющей Z .

Для удобной оценки сейсмичности Крымско-Черноморского региона он поделен на 9 районов: Севастопольский (1), Ялтинский (2), Алуштинский (3), Судакско-Феодосийский (4), Керченско-Анапский (5), Степной Крым (6), Азово-Кубанский (7), Северо-Западный (8), Черноморская впадина (9). Разделение региона на районы проведено условно, в основном для грубой привязки к месту возникновения землетрясений при их описании и простоты формализации базы данных [30]. Значительная часть рассматриваемых землетрясений (261 событие, рис. 2) произошла в Южнобережной части Крыма – Ялтинском, Алуштинском и Судакско-Феодосийском районах, а также в Керчинско-Анапском, несколько землетрясений – в Севастопольском, отдельные землетрясения – в Черноморской впадине.

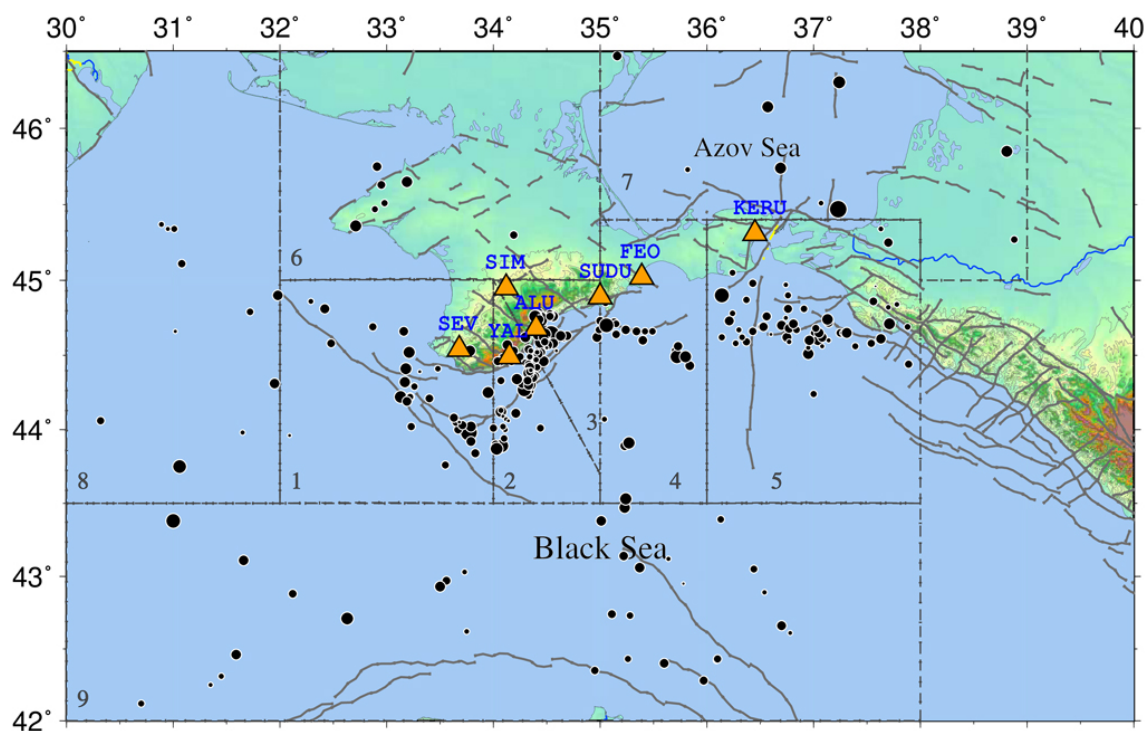


Рис. 2. Эпицентры землетрясений Крымско-Черноморского региона (261 событие, 1990–2022 гг.), для которых опубликованы динамические параметры. Треугольники – станции регистрации землетрясений Крымско-Черноморского региона: ALU – Алушта; KERU – Керчь; SEV – Севастополь; SIM – Симферополь; SUDU – Судак; FEO – Феодосия; YAL – Ялта. Серые линии – разломы по [31]. Штрих-пунктирные линии – границы сейсмических районов: 1 – Севастопольский; 2 – Ялтинский; 3 – Алуштинский; 4 – Судакско-Феодосийский; 5 – Керченско-Анапский; 6 – Степной Крым; 7 – Азово-Кубанский; 8 – Северо-Западный; 9 – Черноморская впадина.

Fig. 2. Earthquake epicenters in the Crimean-Black Sea region (261 events, 1990–2022), for which dynamic parameters have been published. Triangles indicate earthquake recording stations in the Crimean-Black Sea region: ALU, Alushta; KERU, Kerch; SEV, Sevastopol; SIM, Simferopol; SUDU, Sudak; FEO, Feodosia; YAL, Yalta. Gray lines indicate faults according to [31]. Dash-dotted lines mark the boundaries of seismic regions: 1, Sevastopol; 2, Yalta; 3, Alushta; 4, Sudak-Feodosia; 5, Kerch-Anapa; 6, Steppe Crimea; 7, Azov-Kuban; 8, Northwestern; 9, Black Sea Basin.

На рис. 2 показаны положения сейсмических станций, по записям которых строились стационарные спектры землетрясений. Сейсмические станции расположены вдоль Южнобережной части Крыма, а все сейсмические события (за исключением нескольких землетрясений в Керчинско-Анапском районе) произошли в морской части исследуемой территории. Такое расположение станций и землетрясений осложняет задачу учета направленности очага землетрясения, которая решается использованием параметра $R_{\theta\phi}$ (направленность излучения из очага на станцию при вычислении скалярного сейсмического момента).

Некоторые количественные характеристики 261 землетрясения представлены на рис. 3. Зависимость количества землетрясений от количества компонент (E–W, N–S, Z), используемых для расчета ДП, показана на рис. 3 а. Для ~40 % событий динамические параметры определены по одной-двум компонентам, для 35 % событий – по 3–5 и 25 % – по 6–12 компонентам. Магнитуда землетрясений варьирует

в диапазоне $0.27 \leq M \leq 5.41$ ($K_{II} = 5.2–13.1$), значительная часть событий (70 %) имеет магнитуду $M = 1.5–4.0$ (рис. 3 б). Основная часть землетрясений произошла после 2008 г. (рис. 3 с), и максимум событий приходится на 2010 г. Глубина землетрясений 5–35 км (рис. 3 d).

При описании методики расчета ДП землетрясений для Крымско-Черноморского региона в [28] отмечено, что, следуя модели Брюна, спектр смещения объемной волны можно описать с помощью трех основных характеристик: спектральной плотности $\Omega_0(x, f)$ при $f \rightarrow 0$, угла γ наклона огибающей спектра и угловой частоты f_0 . Спектральная плотность $\Omega_0(x, f)$ и угловая частота f_0 являются главными исходными параметрами для расчета скалярного момента M_0 и радиуса круговой дислокации r_0 . Формула для расчета M_0 по стационарному спектру имеет вид:

$$M_0 = \Omega_0(4\pi\rho U^3)R_{\theta\phi} \cdot G(\Delta, h) \cdot C(f) \cdot Sm(f), \quad (1)$$

где Ω_0 – максимальное значение спектральной плотности при $f \rightarrow 0$; ρ – плотность пород в окрестности очага; U – скорость распространения волны; $R_{\theta\phi}$ – направленность излучения из очага на станцию; $G(\Delta, h)$ – поправка за геометрическое расхождение; $C(f)$ – частотная характеристика среды под станцией; $Sm(f)$ – поправка за неупругое затухание в мантии. Методика учета всех этих факторов при переходе от стационарного спектра к спектру источника подробно изложена в [25–27]. Геометрические размеры очага r_0 определялись по угловой частоте f_0 амплитудного спектра смещения. Для дислокационной модели Брюна с разрывом в виде круга радиус дислокации r_0 вычисляется по формуле [29]:

$$r_0 = 2.34 \cdot \frac{U_p}{2\pi \cdot f_0}, \quad (2)$$

где U_p – скорость продольной волны. Выбор скорости волны в формуле зависит от типа волны, по которому строится очаговый спектр (P или S).

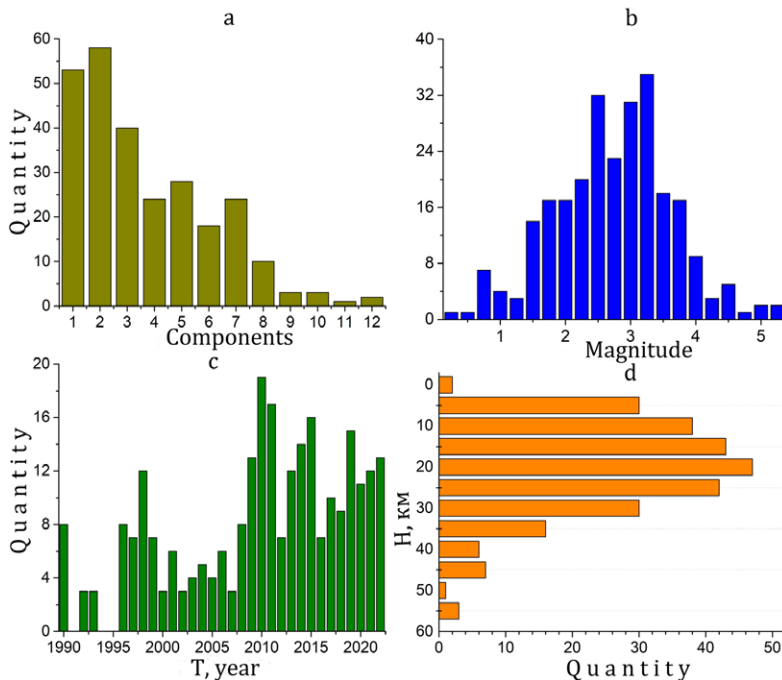


Рис. 3. Количественное распределение рассматриваемых землетрясений (261 событие): а – по количеству компонент (компоненты сейсмической станции E–W, N–S, Z), по которым определены ДП; б – по магнитуде; с – по годам; д – по глубине.

Fig. 3. Quantitative distribution of the earthquakes under consideration (261 events): (a) by the number of components (seismic station component E–W, N–S, Z), by which the DPs were determined; (b) by magnitude; (c) by year; (d) by depth.

Другие динамические параметры очагов, которые перечислены выше, были определены по формулам из работ [25–27] с использованием значений сейсмического момента M_0 и размеров разрыва r_0 . Стоит отметить, что сброс касательных напряжений вычислялся по выражению

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r_0^3}. \quad (3)$$

Такие динамические параметры, как $\eta\sigma$ и $\Delta\sigma_r$, для землетрясений Крымско-Черноморского региона вычисляются с 2011 г., а E_U – с 2014 г.

Средние значения, S , всех динамических параметров и их стандартное отклонение δS найдены с учетом логнормального закона распределения величин [25]. Величина δS в источниках по ДП публикуется с 2006 г. и определена для таких параметров, как скалярный сейсмический момент, M_0 ; радиус очага, r ; сброс касательных напряжений, $\Delta\sigma$; деформация сдвига, ϵ , и средняя подвижка по разрыву, \bar{U} . Среднее значение δS составляет $0.11 \cdot 10^{13}$ Н·м для сейсмического момента, 0.02 км для радиуса очага, 0.01 МПа для сброса касательных напряжений, $0.12 \cdot 10^{-6}$ для деформации сдвига и $0.11 \cdot 10^{-2}$ м для средней подвижки по разрыву.

Для территории Крымско-Черноморского региона в работе выполнен расчет интенсивности сейсмотектонических деформаций (СТД). Для расчета интенсивности СТД использован каталог землетрясений. Данные о землетрясениях, произошедших в регионе, представлены в следующих источниках: Землетрясения Северной Евразии в 2011–2013, 1990–2020, 2021–2023 гг. – 1050 событий (ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), <http://www.gsras.ru>); Ученые записки Крымского Федерального университета им. В. И. Вернадского. География. Геология за 2014–2020 гг. (<https://sn-geography.cfuv.ru/arhiv>) – 767 событий; Сейсмологический бюллетень Украины за 1993–2010 гг. – 738 событий (Библиотека ИФЗ РАН); [32] – 36 событий.

В работе также проведен расчет площадного распределения средневзвешенного значения сброшенных напряжений, а также сравнение сброса напряжений со среднегодовой скоростью СТД. Ниже описана методика рас-

чета средневзвешенного значения сброшенных напряжений и среднегодовой скорости СТД.

Средневзвешенное значение сброшенных напряжений. При расчете площадного распределения сброса напряжений используется подход средневзвешенного значения сброса напряжений. Подробно эта методика описана в работе [33]. Отметим, что при усреднении сброшенных напряжений по выборке естественно вводить весовой множитель g_i , пропорциональный объему очага: т.е. $g_i \sim r_{0i}^3$, где i – номер события в выборке. При этом средневзвешенное значение сброшенных напряжений $\langle \Delta\sigma \rangle_{AW}$ будет определяться выражением:

$$\langle \Delta\sigma \rangle_{AW} = \frac{\sum_i g_i \Delta\sigma_i}{\sum_i g_i} = \frac{\sum_i \Delta\sigma_i r_i^3}{\sum_i r_i^3}. \quad (4)$$

Поскольку в (4) произведение $\Delta\sigma_i r_i^3 = 7/16 (M_0)_i$, то это выражение можно свести к следующей расчетной формуле для средневзвешенного значения сброшенных напряжений:

$$\langle \Delta\sigma \rangle_{AW} = \frac{7 \sum_i (M_0)_i}{16 \sum_i r_i^3}, \quad (5)$$

где суммирование проводится по всем событиям в выборке; M_{0i} – скалярный сейсмический момент землетрясения с номером i ; r_i – значение радиуса очага, вычисленное по модели Брюна.

Среднегодовая скорость СТД, или интенсивность СТД. Для совокупности землетрясений, произошедших в объеме среды V за период времени T , вызванная ими усредненная неупругая деформация описывается тензором скорости разрывной (сейсмотектонической) деформации $\langle \epsilon_{ij} \rangle$ [34, 35]:

$$\langle \epsilon_{ij} \rangle = \frac{1}{\mu VT} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)} m_{ij}^{(\alpha)}, \quad (6)$$

где суммирование проводится по сейсмическим событиям, нумерованным с помощью индекса α ; N – количество событий. В выражении (6) $M_0^{(\alpha)}$ – скалярный сейсмический момент землетрясения с номером (α); $m_{ij}^{(\alpha)}$ – направляющий тензор механизма; μ – 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 сеймотектонической деформации.

Используя предположение о подобии СТД на разных масштабных уровнях (подобии подвижек на реальных определениях механизма очагов землетрясений в широком диапазоне энергий, проверка по которому проведена в ряде работ и найдено подтверждение наличия подобия [36]), это выражение можно преобразовать к виду [34]:

$$\langle \varepsilon_{ij} \rangle = I_{\Sigma} \cdot \langle m_{ij} \rangle, \quad (7)$$

где I_{Σ} – интенсивность сеймотектонической деформации, определяемая выражением [37]:

$$I_{\Sigma} = \frac{1}{\mu VT} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)}. \quad (8)$$

Результаты и обсуждение

В вышеуказанных источниках динамических параметров для всех землетрясений дано значение класса K_{II} . В работе для всех ДП построены зависимости от логарифма скалярного сейсмического момента, а для скалярного сейсмического момента построена зависимость от магнитуды, пересчитанной из

класса K_{II} ($M = 6 + 0.651(K_{II} - 14)$) [38]). Распределение динамических параметров аппроксимировано линейной функцией, а в некоторых случаях двумя функциями – линейной и степенной, и для каждой аппроксимации рассчитан коэффициент детерминации R^2 [39]. Коэффициент R^2 показывает качество подгонки регрессионной модели к наблюдаемым значениям. Если $R^2 = 0$, то регрессия не улучшает качество предсказания, $R^2 = 1$ означает точную подгонку, т.е. все точки наблюдений удовлетворяют уравнению регрессии [39]. Значение коэффициента детерминации в статистике, превышающее 0.5, указывает на приемлемое соответствие регрессионной модели реальным данным. Рассчитанные значения коэффициента детерминации вынесены на графики распределения ДП (рис. 4–7).

Скалярный сейсмический момент считают динамической (очаговой) характеристикой и рассматривают в качестве меры потенциальной энергии, необходимой для перемещения масс по поверхности разрыва [40]. Распределение логарифма скалярного сейсмического момента $\lg(M_0)$ от магнитуды M показано на рис. 4 а. Это распределение хорошо описывается моделью линейного нарастания. Коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0.84$.

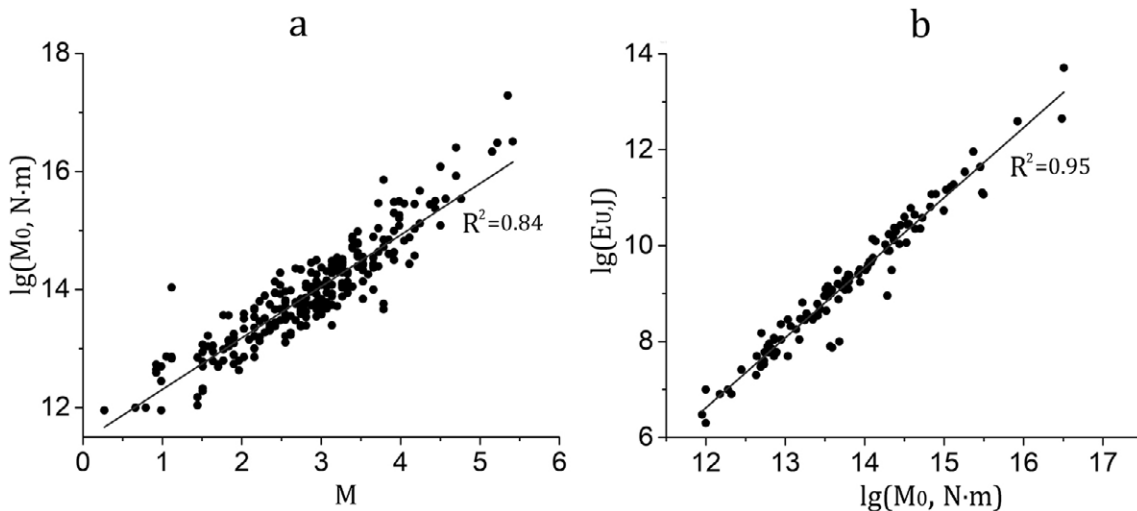


Рис. 4. Распределение логарифма скалярного сейсмического момента $\lg(M_0)$ от магнитуды M , пересчитанной из K_{II} (а), и логарифма энергии образования дислокации в очаге $\lg(E_v)$ от логарифма скалярного сейсмического момента $\lg(M_0)$ (б).

Fig. 4. Distributions of the logarithm of the scalar seismic moment $\lg(M_0)$ from the magnitude M , recalculated from the K_{II} (а), and the logarithm of the energy of dislocation formation at the source $\lg(E_v)$ from the logarithm of the scalar seismic moment $\lg(M_0)$ (б).

Отклонение значений относительно линейной модели (линии регрессии на рис. 4 а) имеет равномерный характер во всем диапазоне рассматриваемых магнитуд. Для скалярного сейсмического момента регрессионную зависимость от магнитуды (наилучшую модель) можно записать в форме

$$\lg(M_0) = 0.87M + 11.43. \quad (9)$$

Для рассматриваемых событий ($0.27 \leq M \leq 5.41$, $K_{II} = 5.2-13.1$) значения M_0 лежат в пределах от $9.0 \cdot 10^{11}$ до $1.9 \cdot 10^{17}$ Н·м.

Энергия образования дислокации (разрыва сплошности среды) в очаге землетрясения – это энергия, которая возникает при внезапном высвобождении упругих напряжений в очаге. Это связано с тем, что очаг землетрясения – объем геологической среды, где происходят разрывы пород и высвобождение упругих напряжений [19]. На рис. 4 б представлено распределение логарифма энергии образования дислокации в очаге E_U от логарифма скалярного сейсмического момента $\lg(M_0)$. Этот параметр в указанных выше источниках приводится для землетрясений Крымско-Черноморского региона с 2014 г. Энергия образования дислокации меняется в диапазоне $2.0 \cdot 10^6 - 5.12 \cdot 10^{13}$ Дж. Распределение хорошо описывается линейной моделью, коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0.95$. Тесная связь между $\lg(E_U)$ и $\lg(M_0)$

обусловлена тем, что величина E_U напрямую зависит от величины скалярного сейсмического момента M_0 .

Размер области очага землетрясения и величина сбрасываемых упругих напряжений обуславливают энергию сейсмических волн и магнитуду землетрясения. Распределение значений радиуса очага Брюна r в зависимости от логарифма скалярного сейсмического момента $\lg(M_0)$ представлено на рис. 5 а. Это распределение описано линейной и степенной функцией. При линейной аппроксимации коэффициент детерминации $R^2 = 0.53$, а при степенной $R^2 = 0.56$. Значения R^2 указывают на то, что обе модели одинаково удовлетворительно описывают рассматриваемое распределение. Величина радиуса r лежит в интервале от ~60 до ~2650 м.

Величина сброшенных напряжений характеризует среднее различие между касательным напряжением в разломе до землетрясения, σ_0 , и после него, σ_1 [41]. Значения сброшенных напряжений (рис. 5 б), определенных по модели Брюна, лежат в диапазоне от 0.011 до 31 МПа. Сброс напряжений меняется незначительно для землетрясений с $\lg(M_0) \leq 15$ ($M_w \leq 4.0$) и имеет большой разброс для землетрясений с $\lg(M_0) > 15$ ($M_w > 4.0$). При линейной аппроксимации коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0.2$, а при степенной $R^2 = 0.3$.

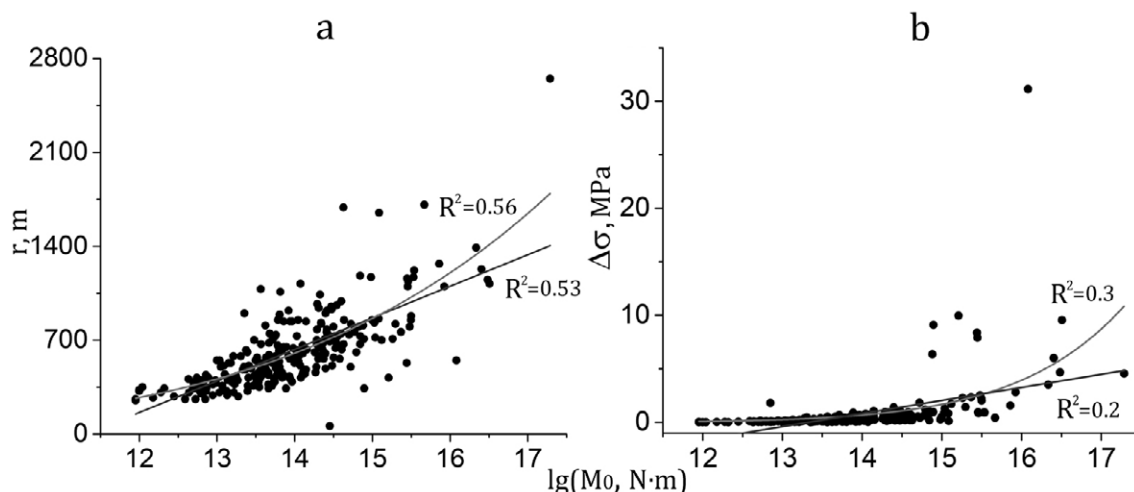


Рис. 5. Распределение радиуса очага r (а) и сброса напряжений $\Delta\sigma$ (б) от логарифма скалярного сейсмического момента $\lg(M_0)$.

Fig. 5. Distribution of the source radius r (а) and the stress drop (б) from the logarithm of the scalar seismic moment $\lg(M_0)$.

Обе модели показывают низкое качество подгонки.

Средняя подвижка по разрыву (или величина дислокации) – один из динамических параметров очага землетрясения. На рис. 6 а представлено распределение средней подвижки по разрыву \bar{U} в логарифмическом масштабе. Для рассматриваемого класса событий этот параметр варьирует в пределах $(0.01-34.13) \cdot 10^{-2}$ м. Распределение этого параметра в логарифмическом масштабе идентично зависимости скалярного сейсмического момента от магнитуды землетрясения. Выражение для вычисления средней подвижки по разрыву включает значение скалярного сейсмического момента и радиуса очага. Распределение этого параметра так же хорошо описывается линейной моделью, как распределение, показанное на рис. 4 а, коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0.87$.

На рис. 6 б показано распределение логарифма *величины деформации сдвига* в зависимости от логарифма скалярного сейсмического момента и аппроксимация распределения линейной моделью. Значение коэффициента детерминации составляет $R^2 = 0.6$, что обусловлено значительными отклонениями некоторых значений распределения от линейной модели. Значение ε меняется от $0.09 \cdot 10^{-6}$ до $\sim 1000 \cdot 10^{-6}$.

Кажущееся напряжение – среднее уменьшение напряжения сдвига вдоль сейсмического разлома (падение статического напряжения). Это один из ключевых параметров, описывающих очаг землетрясения. На рис. 7 а представлено распределение кажущегося напряжения $\eta\sigma$ (для землетрясений Крымско-Черноморского региона рассчитывается с 2011 г.). Этот параметр для землетрясений с $0.27 \leq M \leq 5.41$ изменяется в пределах от 0.005 до 2.05 МПа. Коэффициент детерминации при линейной и степенной аппроксимации имеет идентичное значение и составляет $R^2 = 0.22$. Для сброшенных напряжений степенная модель лучше описывает распределение, чем для касательных напряжений.

Радиационное трение (реакция излучения, лучистое трение, торможение излучением) – сила, действующая на заряженную точечную частицу (например, электрон) со стороны ее собственного электромагнитного излучения, вызываемого неравномерностью движения этой частицы [26]. Распределение величины радиационного трения $\Delta\sigma_r$ (рассчитывается с 2011 г.) показано на рис. 7 б. Для 64 % событий логарифм этого значения варьирует в пределах от 0.2 до -0.2 МПа (вокруг оси абсцисс). Низкие значения коэффициентов детерминации для аппроксимации

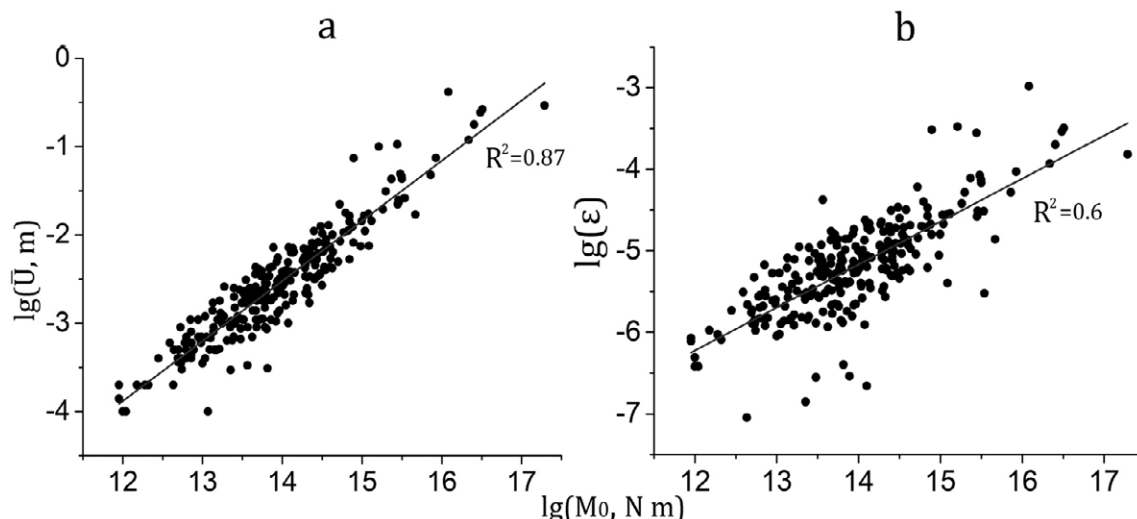


Рис. 6. Распределение средней подвижки по разрыву \bar{U} (величина дислокации) в логарифмическом масштабе (а) и логарифма величины деформации сдвига (б) от логарифма скалярного сейсмического момента $\lg(M_0)$.

Fig. 6. Distributions of the average displacement along the rupture \bar{U} (or the magnitude of the dislocation) in a logarithmic scale (b) and the logarithm of the displacement magnitude from the logarithm of the scalar seismic moment $\lg(M_0)$.

экспериментального распределения линейной функцией ($R^2 = 0.08$) и степенной ($R^2 = 0.31$) показывают, что эти модели не могут быть использованы для описания исследуемого распределения.

Таким образом, для Крымско-Черноморского региона построены распределения различных динамических параметров, характеризующих очаг землетрясения, и определены граничные значения. Коэффициент детерминации, полученный для каждой регрессии, описывающей распределение, показал следующее. Линейная модель хорошо описывает распределение скалярного сейсмического момента $\lg(M_0)$ от магнитуды землетрясения, логарифма энергии образования дислокации в очаге $\lg(E_U)$ от логарифма скалярного сейсмического момента $\lg(M_0)$ и логарифма средней подвижки по разрыву $\lg(E_U)$ от логарифма скалярного сейсмического момента $\lg(M_0)$. В отличие от линейной модели, степенная модель наиболее эффективно описывает распределение радиуса очага от скалярного сейсмического момента $\lg(M_0)$.

Распределение сброшенных напряжений в Крымско-Черноморском регионе. Сброшенные напряжения для рассматриваемых землетрясений варьируют в диапазоне от 0.01 до 31 МПа. Все исследуемые землетрясения по уровню сброшенных напряжений были раз-

биты на шесть групп: $0.01 \text{ МПа} \leq \Delta\sigma < 0.1 \text{ МПа}$ (24.5 % событий); $0.1 \text{ МПа} \leq \Delta\sigma < 0.2 \text{ МПа}$ (19.5 %); $0.2 \text{ МПа} \leq \Delta\sigma < 0.4 \text{ МПа}$ (23 %); $0.4 \text{ МПа} \leq \Delta\sigma < 1 \text{ МПа}$ (22 %); $1 \text{ МПа} \leq \Delta\sigma < 5 \text{ МПа}$ (8 %) и $\Delta\sigma \geq 5 \text{ МПа}$ (3 %). На рис. 8 представлено положение эпицентров исследуемых землетрясений; указано количество событий, соответствующее каждому из указанных диапазонов сброса касательных напряжений.

Согласно выражению (8), интенсивность сейсмотектонической деформации является количественной характеристикой, это дает возможность при ее расчете использовать данные каталога землетрясений. Для территории Крымско-Черноморского региона значение среднегодовой скорости СТД (интенсивность СТД) рассчитано на основе сейсмических данных за 1993–2022 гг.

Наиболее известным соотношением между магнитудой M и скалярным сейсмическим моментом M_0 (Н·м) является зависимость из [35]: $\lg(M_0) = 1.6M + 8.4$, которую можно использовать для расчета скалярного сейсмического момента. Расчет интенсивности СТД выполняется суммированием скалярных сейсмических моментов в пределах каждой области согласно [37]. Расчет логарифма интенсивности СТД проводился для ячеек размером $0.5 \times 0.5^\circ$.

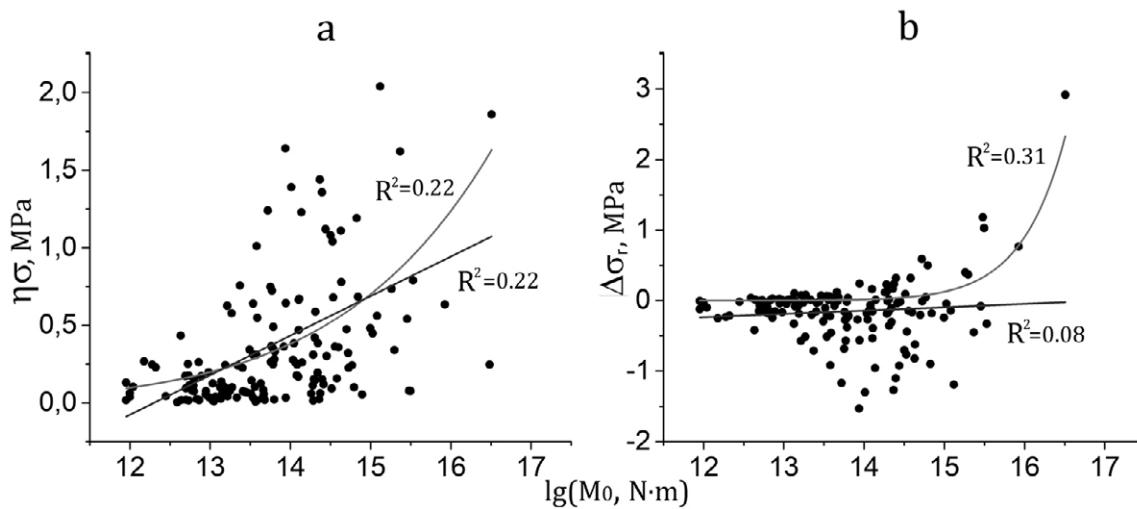


Рис. 7. Распределение кажущегося напряжения $\eta\sigma$ (МПа) (а) и величины радиационного трения $\Delta\sigma_r$ (МПа) (б) от $\lg(M_0)$.

Fig. 7. Distributions of apparent stress $\eta\sigma$ (MPa) (a) and radiation friction value $\Delta\sigma_r$ (MPa) (b) from $\lg(M_0)$.

На рис. 8 фоном представлено распределение логарифма интенсивности СТД. Темно-зеленому цвету соответствует скорость деформации земной коры 10^{-10} год⁻¹. Соответственно, в ячейках темно-зеленого цвета показаны самые крупные события в период с 1993 по 2022 г. Наиболее высоким уровнем интенсивности СТД характеризуются отдельные ячейки Севастопольского, Ялтинского, Алуштинского и Анапско-Керченского районов, где расположена значительная часть землетрясений, для которых определены динамические параметры. По районам суммарный сброс напряжений составил: Севастопольский – 13.8 МПа; Ялтинский и Алуштинский ~64; Судакско-Феодосийский ~9; Керченско-Анапский ~28; Степной Крым ~0.6; Азово-Кубанский ~4; Северо-Западный ~14; Черноморская впадина ~60 МПа.

Максимальный сброс напряжений произошел в Южнобережной части Крыма (Ялтинский, Алуштинский районы) (94 события) и Черноморской впадине (31 событие). Значителен этот показатель и в Керченско-Анапском районе (57 событий).

Положение эпицентров отдельных событий и соответствующее им значение уровня сброшенных напряжений не дают полного представления о площадном распределении сброшенных напряжений. Для построения площадного распределения сброса напряжений исследуемая территория была разбита на ячейки размером $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, и в каждой ячейке, где были землетрясения, рассчитывалось средневзвешенное значение сброшенных напряжений на основе выражения (5). Для визуализации результатов расчета

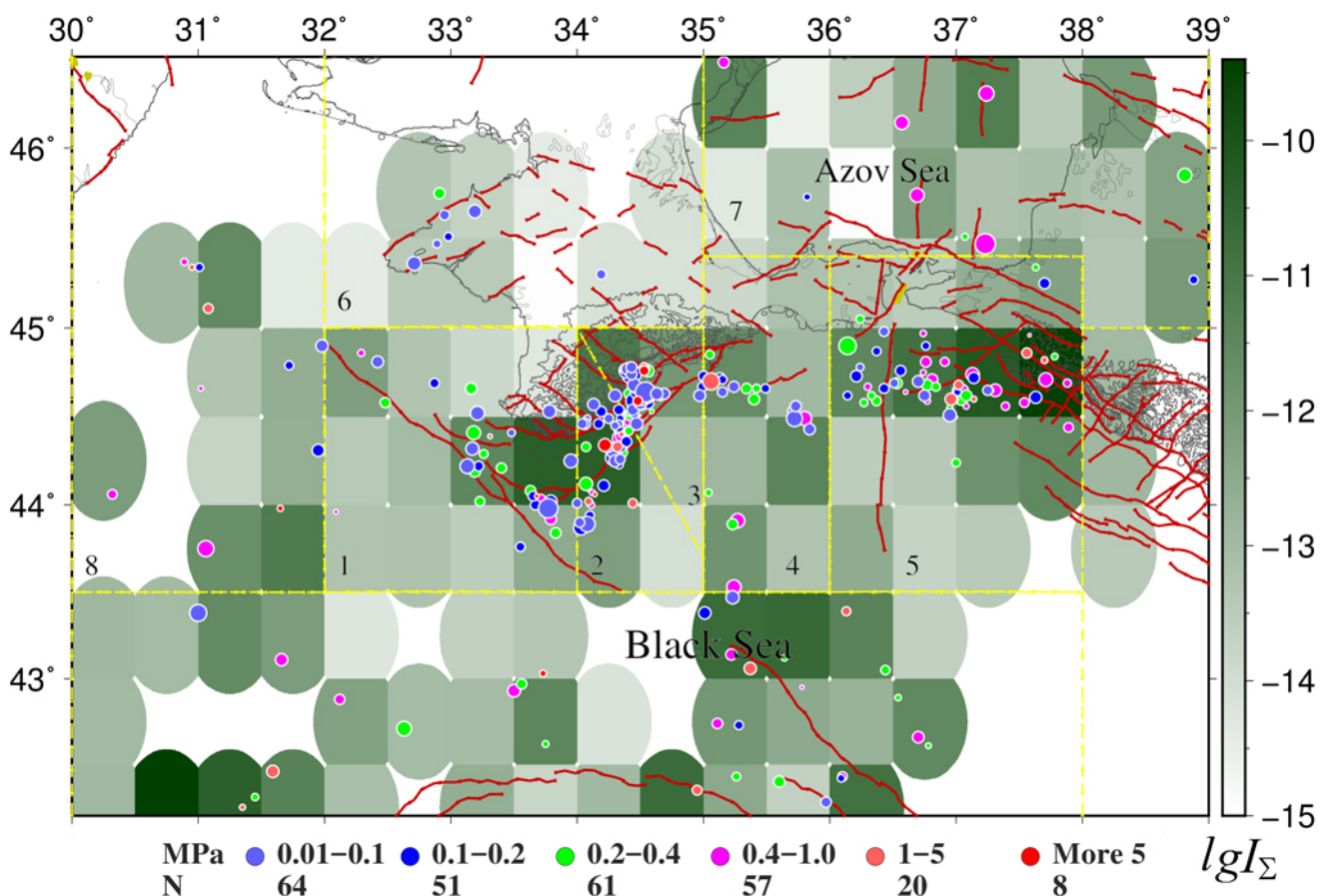


Рис. 8. Положение эпицентров исследуемых землетрясений на фоне распределения интенсивности СТД. Цвет кружка зависит от величины сброшенного напряжения, а размер – от энергетической характеристики. Красные линии – разломы по [31]. Штрих-пунктирные линии – границы сейсмических регионов (см. подпись к рис. 2).

Fig. 8. Locations of the earthquake epicenters in the Crimean-Black Sea region against the background of the STD intensity distribution. The color of the circle depends on the magnitude of the stress drop, and the size depends on the energy characteristic. Red lines indicate faults according to [31]. Dash-dotted lines mark the boundaries of seismic regions (see caption to Fig. 2).

(построения карты) использовалась программа *nearneighbor* пакета GMT [Generic Mapping Tools, <https://www.generic-mapping-tools.org/>], в которой реализован алгоритм ближайшего соседа для присвоения среднего значения каждому узлу, имеющему одну или несколько точек в пределах заданного радиуса от узла. В этом программном пакете узел считается центром эллиптической (круговой) зоны, на которую распространяется вычисленное среднее значение.

На рис. 9 показаны ячейки, для которых получены значения $\langle \Delta\sigma \rangle_{AW}$. Цвет ячейки на карте зависит от величины логарифма усредненных сброшенных напряжений (логарифмический масштаб позволяет более контрастно выделить ячейки с минимальным значением сброшенных напряжений). В каждой ячейке показано сред-

невзвешенное значение сброшенных напряжений и количество событий, попавших в нее.

Максимальное количество событий (44) относится к ячейке, которая совпадает с очаговой областью землетрясения 11 сентября 1927 г. с $M = 6.8$, $\varphi = 44.3^\circ$ с.ш., $\lambda = 34.3^\circ$ в.д. [30]. За время исследования (1990–2022 гг.) в этой области произошло три землетрясения с $K_{II} > 11$, которые сопровождалось небольшим количеством афтершоков. В отдельных ячейках Черноморской впадины значение средневзвешенного сброшенного напряжения составляет 10 и более 31 МПа. В каждой из этих ячеек произошло одно событие (по сути, это значение сброса напряжений). Для ячеек темно-голубого цвета $\langle \Delta\sigma \rangle_{AW} \sim 0.05$ МПа, зеленого цвета ~ 0.16 МПа, желтого ~ 2.1 МПа, красного и оранжевого цвета $\langle \Delta\sigma \rangle_{AW} \sim 2.3$ МПа.

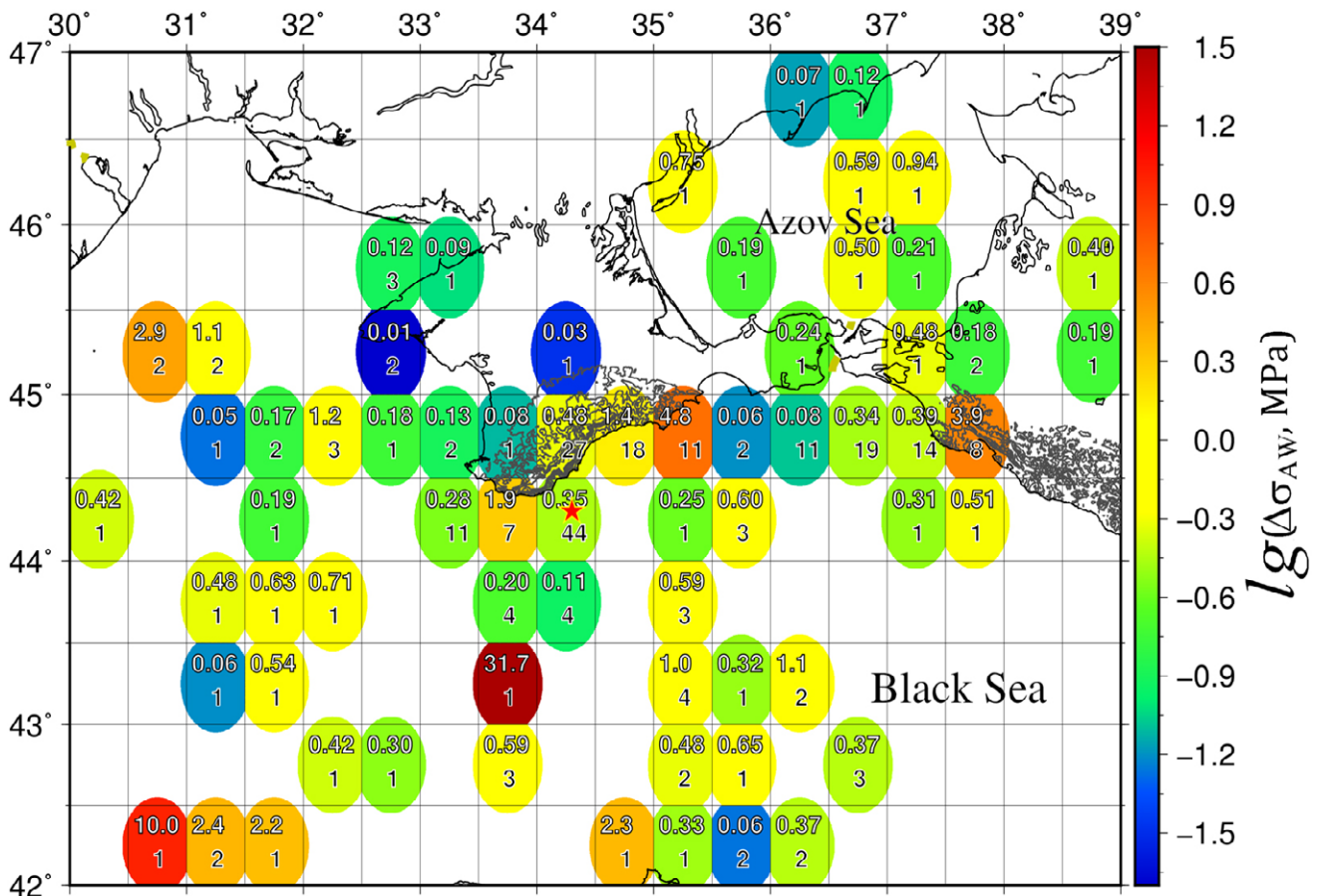


Рис. 9. Распределение значений логарифма средневзвешенного значения сброшенных напряжений. Квадраты – ячейки $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, в каждой из которых рассчитывалось $\langle \Delta\sigma \rangle_{AW}$. Нижняя цифра в ячейке указывает количество событий, попавших в ячейку, верхнее число – значение $\langle \Delta\sigma \rangle_{AW}$ в МПа. Звездочка – положение землетрясения 11 сентября 1927 г.

Fig. 9. Distribution of the logarithm of the weighted average of the stress drop. Squares represent $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ cells, in each of which $\langle \Delta\sigma \rangle_{AW}$ was calculated. The lower number in a cell indicates the number of events within that cell, and the upper number is the $\langle \Delta\sigma \rangle_{AW}$ value in MPa. The asterisk indicates the location of the September 11, 1927 earthquake.

В Южнобережной части Крыма максимальное значение средневзвешенного сброшенного напряжения соответствует ячейке, расположенной в его северной части (Судакско-Феодосийский район), где произошло 11 событий ($\langle \Delta\sigma \rangle_{AW} = 4.8$ МПа), и ячейке в южной части (Севастопольский район), где произошло 7 событий ($\langle \Delta\sigma \rangle_{AW} = 1.9$ МПа). В Анапско-Керченском сейсмическом районе максимальное значение средневзвешенного сброшенного напряжения соответствует ячейке с 8 событиями ($\langle \Delta\sigma \rangle_{AW} = 3.9$ МПа). Эти ячейки могут быть зонами максимального соприкосновения (сцепления) и подгрузки Восточно-Черноморской плиты под Скифскую платформу, о чем указано в работе [12].

Землетрясения в Черноморской впадине могут сопровождаться цунами [42]. Особого внимания заслуживают землетрясения в прибрежной зоне, которые представляют опасность для городов и селений Крыма и Черноморского побережья Кавказа.

Анализ данных по динамическим параметрам землетрясений Крымско-Черноморского региона позволил определить граничные значения исследуемых параметров для землетрясений слабой и умеренной силы. Большое значение имеют данные по сбросу касательных напряжений. В дальнейшем они могут быть использованы при реконструкции напряжений на основе метода катакластического анализа разрывных смещений (МКА, [43]). При выполнении реконструкции напряжений для определения эффективного всестороннего давления в горных массивах требуются данные о динамических параметрах землетрясений, произошедших на исследуемой территории (в частности о величине сброса напряжений при локальном землетрясении).

Мониторинг данных о напряженном состоянии Крымско-Черноморского региона следует рассматривать в качестве основы для тектонофизического районирования участков активных разломов по степени опасности генерирования сильных землетрясений (таких как Ялтинское землетрясение 11.09.1927, $M = 6.8$). Картирование активных разломов по этому признаку позволит выделить наиболее опасные участки и в дальнейшем проводить тектонофизический мониторинг изменения напряженного состояния.

Заключение

Из опубликованных источников собраны данные о динамических параметрах землетрясений слабой и умеренной силы (261 событие с $K_{\Pi} = 5.2-13.1$, $0.27 \leq M \leq 5.41$), которые произошли в Крымско-Черноморском регионе с 1990 по 2022 г. В рассматриваемых источниках расчет динамических параметров землетрясений Крымско-Черноморского региона выполнен на основе модели Брюна. Динамические параметры включают скалярный сейсмический момент, радиус очага, сброс касательных напряжений, кажущееся напряжение, деформацию сдвига и др.

В работе проведен анализ собранных данных: построены распределения динамических параметров от магнитуды и скалярного сейсмического момента; выполнена аппроксимация распределений линейной функцией, а для некоторых распределений степенной функцией; рассчитан коэффициент детерминации. Определена зависимость логарифма скалярного сейсмического момента от магнитуды для Крымско-Черноморского региона, которая имеет вид: $\lg(M_0) = 0.87M + 11.43$. Коэффициент детерминации составляет 0.84.

Проведено сопоставление сброса напряжений с интенсивностью сеймотектонической деформации земной коры. Основной сброс напряжений происходит в областях, где среднегодовая скорость СТД составляет 10^{-10} год⁻¹ – отдельные ячейки Севастопольского, Ялтинского, Алуштинского и Анапско-Керченского районов. Суммарный сброс напряжений в Южнобережной части Крыма (Ялтинский, Алуштинский районы) составляет ~64 МПа, в Черноморской впадине ~60, в Анапско-Керченском районе ~28 МПа.

Для Крымско-Черноморского региона построено распределение средневзвешенного значения сброшенного напряжения и определены зоны максимального и минимального сброса напряжений. Данные о распределении сброса напряжений на территории Крымско-Черноморского региона следует рассматривать в качестве дополнительных данных при тектонофизическом районировании опасных участков активных разломов по степени опасности генерирования сильных землетрясений.

Список литературы

- DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S. Current plate motions. *Geophysical Journal International*. 1990,101:425–478. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1990.tb06579.x>
- DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S. Effects of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters*. 1994,21:2191–2194. <https://doi.org/10.1029/94gl02118>
- Smith D.E., Kolenkiewics R., Robbins J.W., Dunn P.J., Torrence M.H. Horizontal crustal motion in the central and eastern Mediterranean inferred from satellite laser ranging measurements. *Geophysical Research Letters*. 1994,21:1979–1982. <https://doi.org/10.1029/94gl01612>
- Reilinger R. et al. Global Positioning System measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone. *Journal of Geophysical Research*. 1997,102:9983–9999. <https://doi.org/10.1029/96jb03736>
- Tari E., Sahin M., Barka A., Reilinger R., King R., McClusky S., Prilepin M. Active tectonics of the Black Sea with GPS. *Earth Planets Space*. 2000,52:747–751. <https://doi.org/10.1186/bf03352276>
- Segall P., Davis J.L. GPS application for geodynamics and earthquake studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 1997,25:301–336. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.25.1.301>
- Herring T.A. Geodetic applications of GPS. *Proceedings of the IEEE*. 1999,87:92–110. <https://doi.org/10.1109/5.736344>
- McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., Georgiev I., Gurkan O., Hamburger M., Hurst K., Kahle H., et al. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*. 2000,105(B3):5695–5719. doi:10.1029/1996JB900351
- Gorur N. Cretaceous syn- to post-rift sedimentation on the Southern Continental Margin of the Western Black Sea Basin. In: *Regional and petroleum geology of the Black Sea and surrounding region* (ed. by A.G. Robinson). American Association of Petroleum Geologists (AAPG), AAPG Memoir. 1997,68:227–240.
- Spadini G., Robinson A., Cloetingh S. Western versus Eastern Black Sea tectonic evolution: Pre-rift lithospheric controls on basin formation. *Tectonophysics*. 1996,266(1–4):139–154. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(96\)00187-4](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(96)00187-4)
- Миронов А.П., Милюков В.К., Стеблов Г.М. Современные подвижки северного Кавказа и Крыма по GPS наблюдениям. В кн.: *Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докладов всероссийской конференции*, 2016, т. 1, с. 168–170.
- Гобаренко В.С., Муровская А.В., Егорова Т.П., Шеремет Е.Е. Современные коллизионные процессы на северной окраине Черного моря. *Геотектоника*. 2016,4:68–87. doi:10.7868/S0016853X16040020
- Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э., Бондарь М.Н. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма 2022 года. *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология*. 2023,9(4):139–156.
- Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А. Тектонофизическое районирование активных разломов Алтая и Западных Саян, выделение участков подготовки сильных землетрясений. *Геотектоника*. 2025,6:85–118.
- Ребецкий Ю.Л. 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, 2008, с. 359–395.
- Певнев А.К. Прогноз землетрясений возможен (О месте геодезических исследований в решении проблемы прогноза землетрясений). Ч. 1. Г.А. Гамбургцев и возможность прогнозирования землетрясений. *Пространство и Время*. 2015,4(22):195–201.
- Певнев А.К. Прогноз землетрясений возможен: (О месте геодезических исследований в решении проблемы прогноза землетрясений). Ч. 2. Возвращение к Г.А. Гамбургцеву: деформационная модель подготовки очага корового землетрясения. *Пространство и Время*. 2016,1-2(23-24):227–238. URL: https://space-time.ru/spacetime/article/view/2226-7271prov_st1_2-23_24.2016.91 (дата обращения: 02.02.2026).
- Пантелеев И.А., Наймарк О.Б. Современные тенденции в области механики тектонических землетрясений. *Вестник Пермского научного центра УрО РАН*. 2014,3:44–62. EDN: TDURFP
- Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. *Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма*. Киев: Наукова думка, 1990, 249 с.
- Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Капитанова С.А., Поречнова Е.И. Пространственные особенности очаговых параметров землетрясений Крыма. *Сейсмичность Северной Евразии: Материалы Междунар. конф.* Обнинск: ГС РАН, 2008, с. 238–242.
- Пустовитенко Б.Г., Мержей Е.А., Пустовитенко А.А. Динамические параметры очагов землетрясений Крыма по данным цифровых сейсмических станций. *Геофизический журнал*. 2013,35(5):172–186.
- Пустовитенко Б.Г. Уточненные очаговые параметры землетрясений Крыма 1990 года. *Ученые записки Таврического национального университета*

- имени В.И. Вернадского. Серия География. 2014,27(2):169–178.
23. Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake. *Journal Geophysical Research*. 1970,75(26):4997–5009. <https://doi.org/10.1029/jb075i026p04997>
 24. Brune J.N. Corrections [to “Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes”]. *Journal of Geophysical Research*. 1971,76(5002). <http://dx.doi.org/10.1029/JB076i020p05002>
 25. Аптекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., Захарова А.И., Зобин В.М., Коган С.Я., Корчагина О.А., Москвина А.Г., Поликарпова Л.А., Чепкунас Л.С. Спектры Р-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от стационарного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага. *Вулканология и сейсмология*. 1989,2:66–79.
 26. Костров Б.В. *Механика очага тектонического землетрясения*. М.: Наука, 1975, 179 с.
 27. Hanks T.C., Kanamori H. A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*. 1979,84(35):2348–2350. <https://doi.org/10.1029/jb084ib05p02348>
 28. Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В., Мерзей Е.А. Динамические параметры очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона. *Землетрясения Северной Евразии*. 2016,19(2010):296–304.
 29. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона. *Землетрясения Северной Евразии*. 2020,23(2014):250–262.
 30. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Горячун А.В. Землетрясения Крымско-Черноморского региона (инструментальный период наблюдений 1927–1986 гг.). Киев: Наукова думка, 1989, 192 с.
 31. Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифионов В.Г. База данных активных разломов Евразии. *Геодинамика и тектонофизика*. 2017,8(4):711–736. doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0314; EDN: ZWRGN
 32. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Сухорученко С.К., Клянчин А.И. Организация и первые результаты сейсмических наблюдений в северо-западной части территории Крыма (1972–2020 гг.). *Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология*. 2020,6(4):144–169.
 33. Сычева Н.А., Богомолов Л.М. Распределение приведенной сейсмической энергии и сброшенных напряжений в Алтае-Саянском сейсмоактивном регионе. *Геодинамика и тектонофизика*. 2025,16(4):0835. [doi:10.5800/GT-2025-16-4-0835](https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-4-0835)
 34. Юнга С.Л. *Методы и результаты изучения сейсмо-тектонических деформаций*. М.: Наука, 1990, 191 с.
 35. Ризниченко Ю.В. *Проблемы сейсмологии: Избранные труды*. М.: Наука, 1985, 408 с.
 36. Юнга С.Л. *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*. Обнинск, 2002, 41 с.
 37. Лукк А.А., Юнга С.Л. Сеймотектоническая деформация Гармского района. *Известия АН СССР. Физика Земли*. 1979,10:24–43.
 38. Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K.G., Kendall A.D. Origins and methodology of the russian energy K-class system and its relationship to magnitude scales. *Seismological Research Letters*. 2007,78(6):579–590. <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.6.579>
 39. Магнус Я.Р., Катышев П.К., Пересецкий А.А. *Эконометрика. Начальный курс*. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Дело, 2004, 576 с.
 40. Пузырев Н.Н. *Методы и объекты сейсмических исследований*. Новосибирск: Изд-во СО РАН: НИЦО-ИГГМ, 1997, 300 с.
 41. Gibowicz S.J., Kijko A. *An introduction to mining seismology*. San Diego: Academic Press, 1994, 399 p. (International Geophysics). <https://doi.org/10.1016/c2009-0-02348-4>
 42. Никонов А.А. Цунами на берегах Черного и Азовского морей. *Физика Земли*. 1997,1:86–96.
 43. Ребецкий Ю.Л. *Тектонические напряжения и прочность горных массивов*. М.: Академкнига, 2007, 406 с.

References

1. DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S. Current plate motions. *Geophysical Journal International*. 1990,101:425–478. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1990.tb06579.x>
2. DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S. Effects of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters*. 1994,21:2191–2194. <https://doi.org/10.1029/94gl02118>
3. Smith D.E., Kolenkiewics R., Robbins J.W., Dunn P.J., Torrence M.H. Horizontal crustal motion in the central and eastern Mediterranean inferred from satellite laser ranging measurements. *Geophysical Research Letters*. 1994,21:1979–1982. <https://doi.org/10.1029/94gl01612>
4. Reilinger R. et al. Global Positioning System measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasiaplate collision zone. *Journal of Geophysical Research*. 1997,102:9983–9999. <https://doi.org/10.1029/96jb03736>
5. Tari E., Sahin M., Barka A., Reilinger R., King R., McClusky S., Prilepin M. Active tectonics of the Black

- Sea with GPS. *Earth Planets Space*. 2000,52:747–751. <https://doi.org/10.1186/bf03352276>
6. Segall P., Davis J.L. GPS application for geodynamics and earthquake studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 1997,25:301–336. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.25.1.301>
 7. Herring T.A. Geodetic applications of GPS. *Proceedings of the IEEE*. 1999,87:92–110. <https://doi.org/10.1109/5.736344>
 8. McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., Georgiev I., Gurkan O., Hamburger M., Hurst K., Kahle H., et al. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*. 2000,105(B3):5695–5719. doi:10.1029/1996JB900351
 9. Gorur N. Cretaceous syn- to post-rift sedimentation on the Southern Continental Margin of the Western Black Sea Basin. In: *Regional and petroleum geology of the Black Sea and surrounding region* (ed. by A.G. Robinson). American Association of Petroleum Geologists (AAPG), AAPG Memoir. 1997,68:227–240.
 10. Spadini G., Robinson A., Cloetingh S. Western versus Eastern Black Sea tectonic evolution: Pre-rift lithospheric controls on basin formation. *Tectonophysics*. 1996,266(1–4):139–154. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00187-4](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00187-4)
 11. Mironov A.P., Milyukov V.K., Steblou G.M. [Modern movements of the Northern Caucasus and Crimea based on GPS observations]. In: *Chetvertaya tektonofizicheskaya konferentsiya v IFZ RAN. Tectonophysics and current issues of Earth sciences: Materialy dokladov*, 2016, 1, p. 168–170. (In Russ.).
 12. Gobarenko V.S., Murovskaya A.V., Yegorova T.P., Sheremet E.E. Collision processes at the northern margin of the Black Sea. *Geotectonics*. 2016, 50(4):407–424. <https://doi.org/10.1134/S0016852116040026>
 13. Pustovitenko B.G., Eredzhepov E.E., Bondar' M.N. [Spectral and focal parameters of the 2022 Crimean earthquakes]. *Uchenyye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2023,9(4):139–156. (In Russ.).
 14. Rebetsky Yu.L., Sycheva N.A. Tectonophysical zoning of active fault in the Altai-Western Sayan region: Identification of locations for preparation of strong earthquakes. *Geotectonics*. 2025,59(6):518–546 <https://doi.org/10.1134/S0016852125700402>
 15. Rebetskiy Yu.L. [Current state of earthquake prediction theories. Results of the estimation of natural stresses and a new earthquake source model]. In: *Problemy tektonofiziki: K sorokaletiyu sozdaniya M.V. Gzovskim laboratorii tektonofiziki v IFZ RAN*. Moscow: IFZ RAN, 2008, p. 359–395. (In Russ.).
 16. Pevnev A.K. Earthquake forecasting is possible (On the place of geodetic research in solving the problem of earthquake forecasting). Pt 1. Grigory A. Gamburtsev and possibility of earthquake prediction. *Prostranstvo i Vremya = Space and Time*. 2015,4(22):195–201. (In Russ.).
 17. Pevnev A.K. Earthquake forecasting is possible: (On the place of geodetic research in solving the problem of earthquake forecasting). Pt 2. Back to Grigory A. Gamburtsev's theory: Deformation model for preparation of crustal earthquake source. *Prostranstvo i Vremya = Space and Time*. 2016,1-2(23-24):227–238. (In Russ.). URL: https://space-time.ru/space-time/article/view/2226-7271prov_rstl_2-23_24.2016.91 (accessed 02.02.2026).
 18. Panteleev I.A., Naimark O.B. Modern trends in mechanics of tectonic earthquakes. *Perm Federal Research Center J.* 2014,3:44–62. (In Russ.). EDN: TDURFP
 19. Pustovitenko B.G., Panteleyeva T.A. [Spectral and focal parameters of the Crimean earthquakes]. Kyiv: Naukova dumka, 1990, 249 p. (In Russ.).
 20. Pustovitenko B.G., Pustovitenko A.A., Kapitanova S.A., Porechnova E.I. [Spatial features of source parameters of the Crimean earthquakes]. *Seysmichnost' Severnoy Yevrazii: Materialy Mezhdunar. konf. Obninsk: GS RAN*, 2008, p. 238–242. (In Russ.).
 21. Pustovitenko B.G., Merzhey E.A., Pustovitenko A.A. [Dynamic parameters of the earthquake source in Crimea based on the data from digital seismic stations]. *Geofizicheskiy zhurnal*. 2013,35(5):172–186. (In Russ.).
 22. Pustovitenko B.G. [Refined source parameters of the 1990 Crimean earthquakes]. *Uchenyye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Seriya Geografiya*. 2014,27(2):169–178. (In Russ.).
 23. Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake. *Journal Geophysical Research*. 1970,75(26):4997–5009. <https://doi.org/10.1029/jb075i026p04997>
 24. Brune J.N. Corrections [to “Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes”]. *Journal of Geophysical Research*. 1971,76(5002). <http://dx.doi.org/10.1029/JB076i020p05002>
 25. Aptekman Zh.Ya., Belavina Yu.F., Zakharova A.I., Zobin V.M., Kogan S.Ya., Korchagina O.A., Moskvina A.G., Polikarpova L.A., Chepkunas L.S. [P-wave spectra in the problem concerning determination of dynamic parameters of earthquake focuses: transition from station-obtained spectrum to the focal one and the calculation of dynamic focal parameters]. *Volcanology and Seismology*. 1989,2: 66–79. (In Russ.).
 26. Kostrov B.V. [Focal mechanics of a tectonic earthquake]. Moscow: Nauka, 1975. (In Russ.).

27. Hanks T.C., Kanamori H. A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*. 1979,84(35):2348–2350. <https://doi.org/10.1029/jb084ib05p02348>
28. Pustovitenko B.G., Kalinyuk I.V., Merzhey E.A. [Dynamic parameters of earthquake sources in the Crimean-Black Sea region]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii = Earthquakes in Northern Eurasia*. 2016,19(2010):296–304. (In Russ.).
29. Pustovitenko B.G., Eredzhepov E.E. [Spectral and source parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii = Earthquakes in Northern Eurasia*. 2020,23(2014):250–262. (In Russ.).
30. Pustovitenko B.G., Kulchitsky V.E., Goryachun A.V. [Earthquakes of the Crimean-Black Sea region (instrumental observation period 1927–1986)]. Kyiv: Naukova Dumka, 1989. (In Russ.).
31. Bachmanov D.M., Kozhurin A.I., Trifonov V.G. The active faults of Eurasia database. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2017,8(4):711–736. (In Russ.). doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0314
32. Pustovitenko B.G., Kul'chitskiy V.E., Sukhoruchenko S.K., Klyanchin A.I. [Organization and first results of seismic observations in the northwestern part of Crimea (1972–2020)]. *Uchenyye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2020,6(4):144–169. (In Russ.).
33. Sycheva N.A., Bogomolov L.M. Distribution of reduced seismic energy and stress drop in the Altai-Sayan seismoactive region. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2025,16(4):0835. (In Russ.). [doi:10.5800/GT-2025-16-4-0835](https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-4-0835)
34. Yunga S.L. [Methods and results of studying seismotectonic deformations]. Moscow: Nauka, 1990. (In Russ.).
35. Riznichenko Yu.V. [*Problems of seismology*]. Moscow: Nauka, 1985. ([Selected works]). (In Russ.).
36. Yunga S.L. *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, 2002. (In Russ.).
37. Lukk A.A., Yunga S.L. Seismotectonic deformation of the Garm region. *Izv. AN SSSR, Fizika Zemli*. 1979,10:24–43. (In Russ.).
38. Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K.G., Kendall A.D. Origins and methodology of the russian energy K-class system and its relationship to magnitude scales. *Seismological Research Letters*. 2007,78(6):579–590. <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.6.579>
39. Magnus YA.R., Katyshev P.K., Peresetskiy A.A. [*Econometrics. A beginner's course*. 6th ed., rev. and suppl.]. Moscow: Delo, 2004. (In Russ.).
40. Puzyrev N.N. [*Methods and objects of seismic research*]. Novosibirsk: SO RAN Publ.: NITsOIGGM, 1997. (In Russ.).
41. Gibowicz S.J., Kijko A. *An introduction to mining seismology*. San Diego: Academic Press, 1994. (International Geophysics). <https://doi.org/10.1016/c2009-0-02348-4>
42. Nikonov A.A. [Tsunami on the shores of the Black and Azov Seas]. *Fizika Zemli*. 1997,1:86–96. (In Russ.).
43. Rebetsky Yu.L. *Tectonic stresses and strength of rock massifs*. Moscow: Akademkniga, 2007. (In Russ.).

Об авторе

Сычева Найля Абдулловна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия, nelya@ifz.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0386-3752>

Поступила 03.10.2025

Принята к публикации 20.01.2026

About the Author

Sycheva, Nailya A., Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, nelya@ifz.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0386-3752>

Received 3 October 2025

Accepted 20 January 2026