

УДК 523.98; 524.1; 550.34

## Солнечная активность, галактические космические лучи и сейсмичность Рача–Джавской зоны Большого Кавказа

© 2026 г. А.В. Мясников<sup>1</sup>, З.И. Дударов<sup>2</sup>, С.С. Багаева<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия; <sup>2</sup>ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия;

<sup>3</sup>СОФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Владикавказ, Россия

Поступила в редакцию 19.11.2025 г.

**Аннотация.** Проводится корреляционный анализ зависимости уровня сейсмической активности Рача-Джавской зоны, расположенной в Центральном сегменте Большого Кавказа, и уровня интенсивности галактических космических лучей по данным нейтронного монитора. В обработку приняты записи 2827 сейсмических событий с 1997 по 2023 г., что соответствует 23–25 циклам солнечной активности. Выбор данного интервала связан с тем обстоятельством, что практически вся сейсмическая активность в этой зоне связана с разрядкой напряжений, возникших после одного из сильных на Кавказе Рачинского землетрясения, произошедшего 29 апреля 1991 г. ( $M_s=7.0$ ). В качестве предварительного анализа показано, что интенсивность галактических космических лучей, мерой которых является темп счёта нейтронного монитора в Новосибирске, модулируется уровнем солнечной активности и образует высокую, по абсолютному значению, отрицательную корреляцию  $r=-0.89$  с задержкой около четырёх месяцев. Вместе с тем, уровень выхода сейсмической энергии на указанном интервале времени образует значимую положительную корреляцию  $r=0.48$  с интенсивностью галактических космических лучей с задержкой порядка одного месяца. Таким образом, максимальный выход сейсмической энергии «подготовленных» землетрясений одной консолидированной зоны приходится на минимум солнечной активности с задержкой порядка 10 месяцев и порядка полугода от максимального уровня интенсивности галактических космических лучей. Анализ корреляционных функций всех пар исследуемых процессов показал наличие единственной точки экстремума, что свидетельствует о высокой достоверности этой связи.

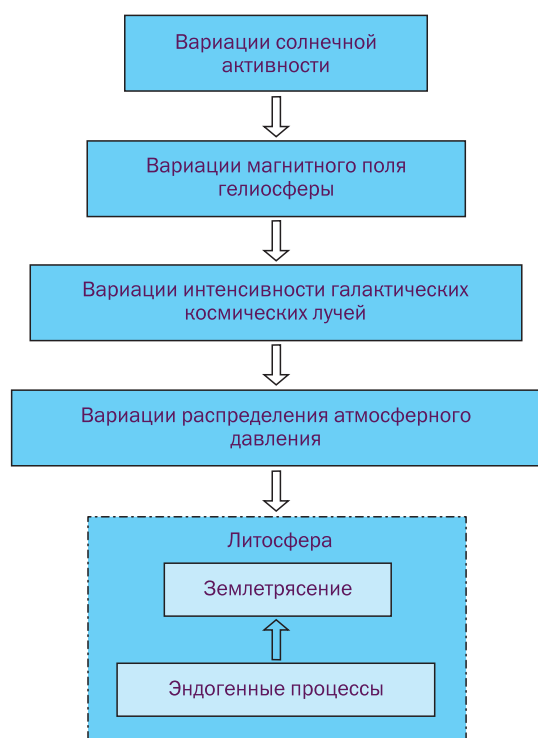
**Ключевые слова:** солнечная активность, галактические космические лучи, атмосфера, сейсмичность, сейсмоактивная зона, теория упругой отдачи.

**Для цитирования:** Мясников А.В., Дударов З.И., Багаева С.С. Солнечная активность, галактические космические лучи и сейсмичность Рача-Джавской зоны Большого Кавказа // Российский сейсмологический журнал. – 2026. – Т. 8, № 1. – С. 72–82. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2026.1.05>. – EDN: PKEBBS

### Введение

Первые результаты о существовании связи сейсмической активности Земли (САЗ) и солнечной активности (СА) появились в цикле работ [Сытинский, 1989], где на интервале 1963–1989 гг. были проведены эти исследования [Khegai et al., 2021], и приведены важные количественные эмпирические соотношения между уровнем СА и САЗ. Исходя из анализа всех имеющихся у авторов данных, можно сделать вывод о влиянии СА на землетрясения через атмосферные процессы. Схема вероятного воздействия СА на развитие интенсивных землетрясений была следующим образом детализирована – изменение СА влечёт

за собой изменение межпланетного магнитного поля вблизи Земли, которое влияет на интенсивность галактических космических лучей (ГКЛ). Изменение интенсивности ГКЛ вызывает атмосферные перестройки, вследствие которых нарушается баланс давлений на стыке блоков земной коры. Если накопленные упругие деформации уже достаточно велики на границе рассматриваемых блоков, то они становятся больше предела прочности, который может выдержать горная порода, блоки смещаются друг относительно друга и тогда, согласно теории упругой отдачи, происходит землетрясение [Khegai et al., 2021]. Блок-схема, которая отражает этот процесс, приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Блок-схема влияния вариации СА на интенсивность ГКЛ, которые, в свою очередь, воздействуют на параметры атмосферы Земли

В работах [Mishev, Velinov, 2015; Yanchukovsky, 2021; Pätsi, Mishev, 2022] находим, что ГКЛ являются основным источником ионизации атмосферы до высот около 100 км, приводящим к существенным физическим изменениям в атмосферном воздухе. Образовавшиеся ионы участвуют во многих атмосферных процессах: в формировании облачного покрова, в образовании осадков и аэрозолей, а также влияют на прозрачность атмосферы, глобальную электрическую цепь и циклогенез на средних и высоких широтах.

В [Yanchukovsky, 2021; Khagai et al., 2021] в качестве меры сейсмической активности принято количество сильных землетрясений в год. Было установлено, что в период наибольшей СА происходит минимальное количество сильных землетрясений и наоборот. С другой стороны, между СА и интенсивностью ГКЛ высокая степень корреляции по абсолютному значению и отрицательная – по знаку, по данным [Yanchukovsky, 2021] коэффициент корреляции  $r = -0.82$ , по данным [Khagai et al., 2021] корреляция составляет  $r = -0.81$ . По сути СА модулирует через магнитное поле межпланетного пространства интенсивность ГКЛ. Вариация интенсивности ГКЛ имеет цикличность порядка 11 лет, как и вариации СА, но с разни-

цей фазы примерно  $\pi$  радиан относительно СА или порядка 5.5 лет. Таким образом, между уровнем САЗ и интенсивностью ГКЛ должна существовать положительная корреляционная связь, что, собственно, и было показано в указанных выше работах. В качестве уровня сейсмичности выступало количество сильных землетрясений (были предложены различные варианты, начиная с  $M_w > 5$ ) на планете в целом.

Целью данной работы является выявление связи между вариацией интенсивности ГКЛ и уровнем выхода сейсмической энергии одного сейсмоактивного очага центрального сегмента Большого Кавказа (БК) Рача-Джавской зоны, характерный размер которой порядка 100 км. Рассматриваемая сейсмоактивная область входит в зону ответственности Северо-Осетинского филиала ФИЦ ЕГС РАН (<https://sofgras.ru/>), где более двух десятилетий проводятся непрерывные сейсмические наблюдения. Статистические данные, полученные в ходе многолетних наблюдений, позволяют исследовать тектоническую активность региона и устанавливать закономерности солнечно-земных процессов.

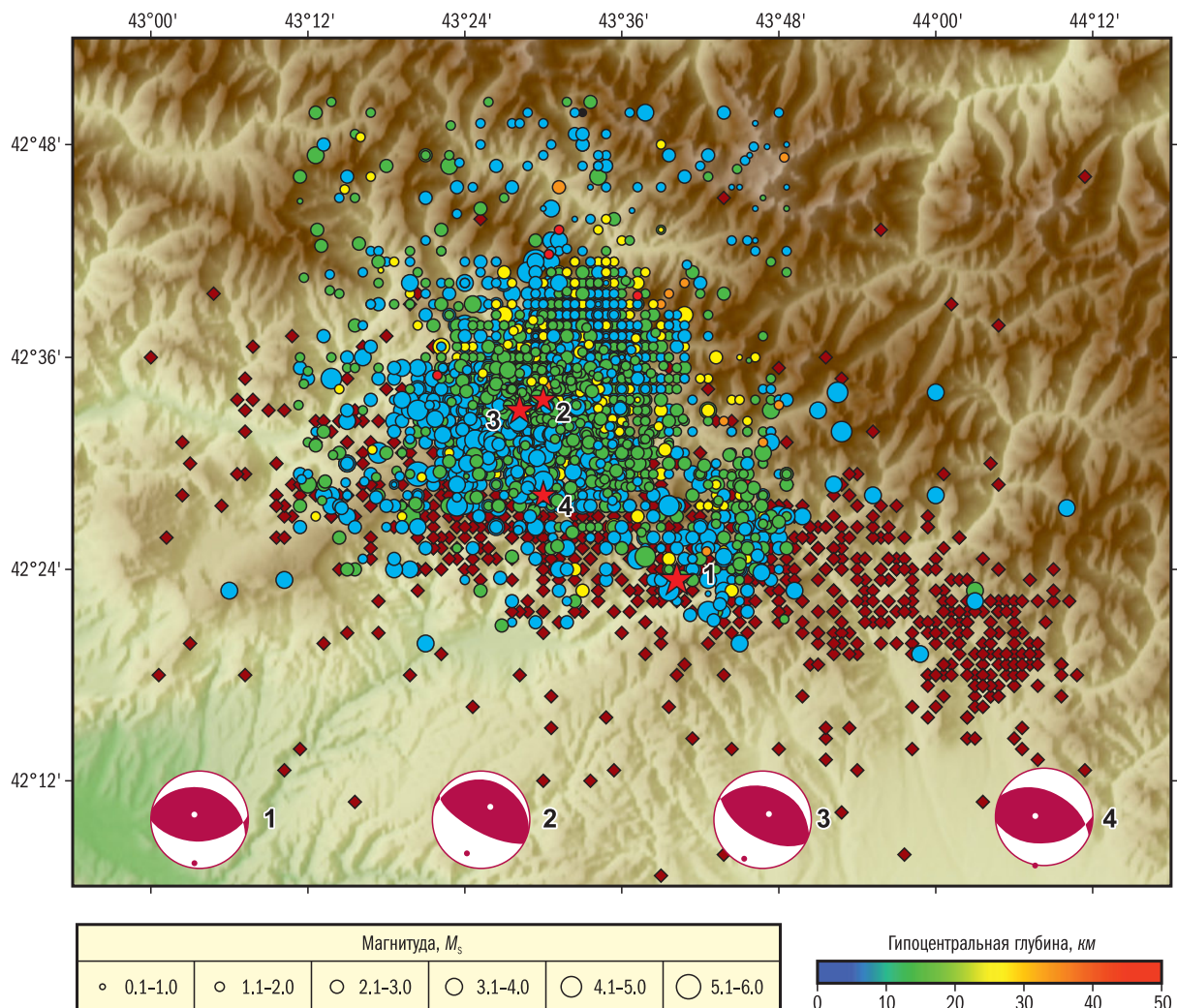
#### Общие сведения о Рача-Джавской сейсмической зоне

Региональная тектоника определяется коллизией Аравийской и Евразийской литосферных плит, происходящей со скоростью около 3 см/год. В более крупном масштабе Рача-Джавская зона располагается в зоне надвига флишево-складчатых структур южного склона БК на Дзирульский выступ срединного массива Грузинской глыбы [Тихоцкий и др., 2011]. Данная область начала проявлять сейсмическую активность после Рачинского землетрясения 29 апреля 1991 г. с  $M_s = 7.0$  со множеством афтершоков. Глубина и механизм главного события указывает, что толчок включал разрыв вдоль падающего на север сброса в верхней коре без прорыва на дневную поверхность [Tan, Taymaz, 2006]. Позже, 6 февраля 2006 г. и 7 сентября 2009 г., всего в 20–25 км к северо-западу от эпицентра главного толчка Рачинского события 1991 г. под действием напряжений сжатия, ориентированных в близмеридиональном направлении, произошли Онийское-I и Онийское-II землетрясения с магнитудами  $M_s = 4.6$  и 5.8 соответственно. Эти события были самыми крупными в этом районе с 1991 года. Решения механизмов очагов [Габсатарова и др., 2012; Габсатарова, 2015] этих событий показывают, что нодальные плоскости  $NPI$  имеют северо-западное простирание

и пологое залегание, а плоскости *NP2* – более крутые, которые простираются субширотно у Онийского-I землетрясения и на востоко–юго-восток у Онийского-II. Тип подвижки по пологим плоскостям – надвиг с компонентами левостороннего сдвига. Движение по второй плоскости представлено взбросом с компонентами правостороннего сдвига. Также в очаговой зоне, в 16 км к северо-западу от события 1991 г., имело место землетрясение 6 ноября 2018 г. с  $M_s=4.7$ , но в отличие от Онийских землетрясений за ним не последовал сильный афтершоковый процесс.

Всего по данным [Землетрясения России, 2015] и локальной базы данных Северо-Осетин-

ского филиала ФИЦ ЕГС РАН, в Рача-Джавской зоне в рассматриваемый временной интервал 1997–2023 гг. зарегистрировано 3898 событий с магнитудами  $0.1 \leq M_s \leq 5.8$ . Эпицентры очагов этих землетрясений (рис. 2) находились в пределах координат  $42^\circ 10' - 42^\circ 50' N$  и  $43^\circ 00' - 44^\circ 10' E$ , что соответствует характерным размерам области порядка  $50 \times 112$  км. Статистическим методом GFT (Goodness-of-Fit Test) [Woessner, Wiemer, 2005] определена магнитуда полноты каталога  $M_c=1.1$  с коэффициентом детерминации  $R^2=0.98$ . Параметры закона Гутенберга-Рихтера для данной  $M_c$  составляют  $a=4.327$  и  $b=0.776$ , а количество событий – 2827.



**Рис. 2.** Карта распределения эпицентров землетрясений Рача-Джавской сейсмоактивной зоны с фокальными механизмами очагов наиболее сильных землетрясений.

Размер эпицентров пропорционален магнитуде в соответствии со шкалой внизу рисунка. Круглыми маркерами представлены события 1997–2023 гг. на фоне эпицентров (маркеры в виде ромба) афтершоков [Арефьев и др., 1993; Захарова и др., 1993; Габсатарова, Борисов, 2018] Рачинского землетрясения 29 апреля 1991 г. с  $M_s=7.0$ . Цветом в соответствии со шкалой внизу приведены гипоцентры землетрясений 1997–2023 гг. Маркерами в виде звёздочек отмечены эпицентры сильных событий: 1 – Рачинское 29 апреля 1991 г. с  $M_s=7.0$ ; 2 – Онийское-I 6 февраля 2006 г. с  $M_s=4.6$ ; 3 – Онийское-II 7 сентября 2009 г. с  $M_s=5.8$ ; 4 – землетрясение 6 ноября 2018 г. с  $M_s=4.7$

Глубина гипоцентральной области находится в интервале 0–25 км, было отмечено её увеличение с 12 км в период 2001–2005 гг. до 25 км в 2011–2020 гг. Увеличение плотности распределения гипоцентров землетрясений в 2006–2010 гг. связано с проявлением Онийского-I и Онийского-II землетрясений, сопровождавшихся большой серией афтершоков. Эти пространственно-временные особенности связаны, по-видимому, с процессами накопления и разрядки напряжений в восточной части Рача-Джавской зоны [Стогний и др., 2024].

### Используемые данные ГКЛ и СА

В качестве меры интенсивности СА были выбраны числа Вольфа ( $W$ ). Данные в открытом доступе размещены на веб-сайтах [World ..., 2025; International ..., 2025]. Вариации  $W$  даны с шагом одни сутки.

Вариации интенсивности ГКЛ были получены по данным нейтронного монитора 24NM-64, установленного в среднеширотной станции «Новосибирск», которая входит в мировую сеть станций космических лучей. Данные в открытом доступе размещены на сайте [Новосибирский ..., 2025]. Интенсивность ГКЛ, как темп счёта событий нейтронного монитора ( $Nn$ ), дана с периодом 1 час.

На рис. 3 приведены графики вариации  $W$  и  $Nn$  с 1995 по 2025 г. (соответствует 23–25 солнечным циклам [Yazev et al., 2023]). С помощью низкочастотного симметричного нерекурсивного цифрового фильтра с ограниченной областью отклика, что исключает фазовый

сдвиг на выходе фильтра относительно исходного сигнала, получены усреднённые значения. Алгоритмы обработки сигналов подробно описаны в [Мясников, Стогний, 2025; Ormsby, 1961]. Усреднённые значения показаны на рис. 3 с 1997 по 2023 г., в соответствии с используемыми данными каталога сейсмических событий Рача-Джавской зоны. Даже без специального корреляционного анализа видна высокая отрицательная корреляция этих процессов.

### Предварительный анализ используемых данных ГКЛ и СА

На рис. 4 показаны результаты корреляционного анализа вариации  $W$  и  $Nn$ . Как и в работах [Yanchukovsky, 2021; Khegai et al., 2021], получено высокое значение корреляции по своему абсолютному значению. Но корреляционная функция однозначно указывает на существование сдвига между этими процессами. Для оригинальных (исходных) данных максимум абсолютной корреляции достигается через 111 дней после прохождения минимума СА и составляет  $r = -0.75$ . Для данных после обработки низкочастотным фильтром эти параметры достигают соответственно 132 дня и  $r = -0.89$ . Таким образом, амплитуда интенсивности ГКЛ модулируется магнитным полем гелиосферы, которая, в свою очередь, определяется СА согласно схеме на рис. 1. Вариация интенсивности ГКЛ достигает своего максимума примерно через четыре месяца после прохождения минимума СА. Дальнейший анализ строится на изучении вариации амплитуды ГКЛ, учитывая результат, показанный выше.

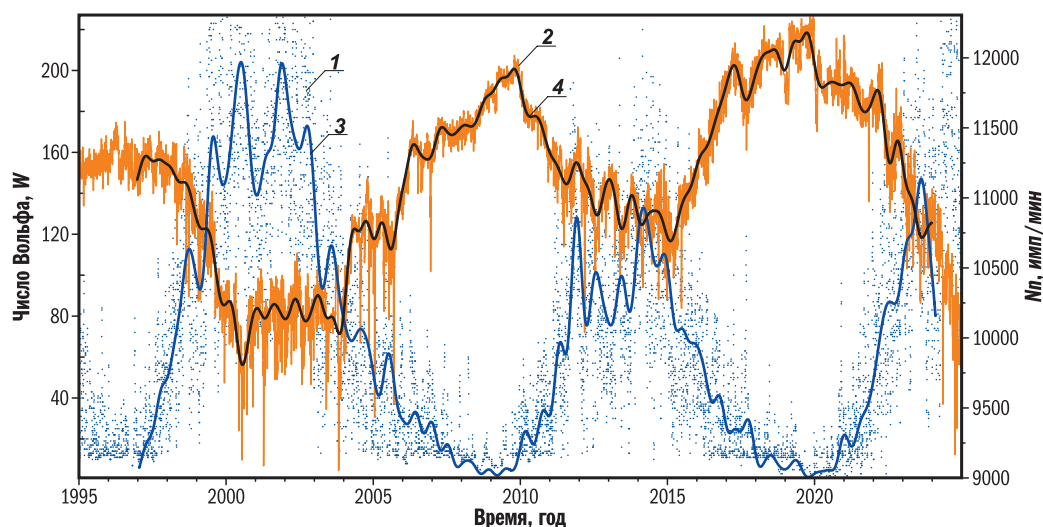


Рис. 3. Вариации  $W$  (точки 1) и  $Nn$  (кривая 2) за временной период 1995–2025 гг., а также усреднённые значения  $W$  (кривая 3) и  $Nn$  (кривая 4) в интервале 1997–2023 гг.

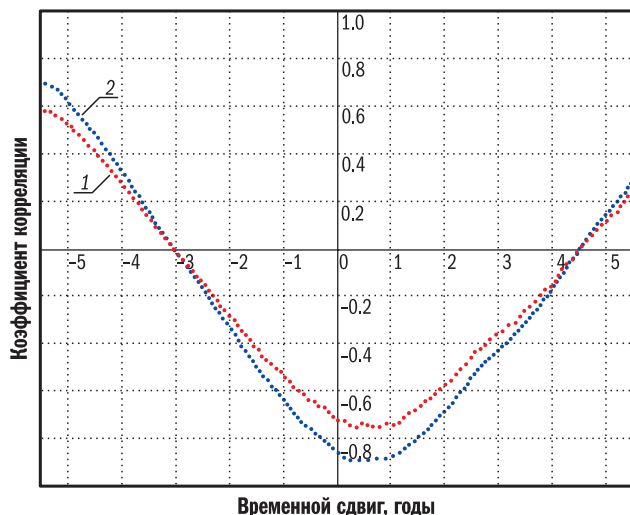


Рис. 4. Графики корреляционных функций.

1 — оригинальная пара: вариации  $W$  и  $Nn$  за период 1997–2023 гг.; 2 — фильтрованная пара исходных вариаций

В нашей работе в качестве меры сейсмической активности был выбран уровень выхода сейсмической энергии Рача-Джавской зоны. Энергия землетрясения связана с магнитудой по поверхностным волнам  $M_s$  эмпирическим соотношением Гутенберга-Рихтера:

$$\lg E = 1.5 \cdot M_s + 4.8 \text{ [Дж]}.$$

Следовательно, вариация сейсмической энергии ( $E$ ) определяется суммой воздействий всех землетрясений, произошедших за выбранную единицу времени (шаг — месяц или год).

Данные по Рача-Джавской зоне доступны с 1991 г., практически после Рачинского землетрясения 29 апреля 1991 г. с магнитудой  $M_s = 7.0$ . И здесь встает один из ключевых вопросов этой работы. Как было отмечено в [Сытинский, 1989; Yanchukovsky, 2021; Khagai et al., 2021], связь СА с сейсмичностью Земли осуществляется опосредованно, через модуляцию ГКЛ и атмосферные процессы, которые провоцируют появление землетрясений в регионах, где ситуация уже была подготовлена [Гохберг и др., 1983; Хегай, 2013] тектонической деятельностью. Не все сейсмические события могут быть успешно включены в эту статистику. Относительно Рача-Джавской зоны в [Стогний и др., 2024] отмечено следующее обстоятельство: «Сейсмическая активизация Рача-Джавской зоны в начале XXI в. связана с разрядкой напряжений, возникших после одного из сильных на Кавказе

Рачинского землетрясения». Таким образом, в обработку вошли все представительные землетрясения ( $M_s \geq 1.1$ ) с начала 1997 г. до конца 2023 г., которые и были «подготовлены» Рачинским землетрясением 1991 г., в то время как само Рачинское землетрясение было результатом тектонических напряжений соседних блоков консолидированной коры, которые и формируют условия накопления энергии сейсмического очага [Стогний и др., 2024].

Следуя вышеизложенной аргументации, для обработки был выбран интервал данных  $W$ ,  $Nn$  и  $E$  27 лет (1997–2023 гг.) или 2.5 солнечных цикла (23–25).

### Результаты обработки

В дальнейшем для определенности будем рассматривать только вариацию  $Nn$  и уровень выделившейся сейсмической энергии  $E$  за временной интервал 1997–2023 гг. На рис. 5а в логарифмическом масштабе показана эмиссия сейсмической энергии Рача-Джавской зоны. Уровень сейсмической энергии (здесь и далее под уровнем сейсмической энергии понимается логарифм этого значения), выделившейся в течение календарного месяца (кривая 1), и годовой ход (кривая 2) представлены в виде столбчатой диаграммы. Кривые 3 и 4 показывают ход вариации  $Nn$  за период 1995–2025 гг. и усредненную вариацию  $Nn$  в интервале 1997–2023 гг. соответственно. Таким образом, в обработку включено два ряда данных длиной 9861 точек (27 лет по 365.25 суток). На рис. 5б показан тот же результат обработки, но в виде «сухого остатка», для полной наглядности этого результата. Кривые 4 и 5 на рисунке показывают, соответственно, годовую вариацию среднего значения  $Nn$  и  $E$ , обработанную низкочастотным фильтром для дальнейшего анализа.

### Корреляционный анализ

Для построения корреляционных функций были выбраны две пары процессов. Пара I — оригинальный ряд  $Nn$  и уровень годовой вариации  $E$  (рис. 5а). Пара II — ряд средней  $Nn$  и сглаженный уровень годовой вариации  $E$  (рис. 5б). Результаты корреляционного анализа показаны на рис. 6. Две корреляционные функции практически совпадают, но, как и ожидалась, корреляция второй пары несколько выше. Все результаты корреляционного анализа приведены в таблице.

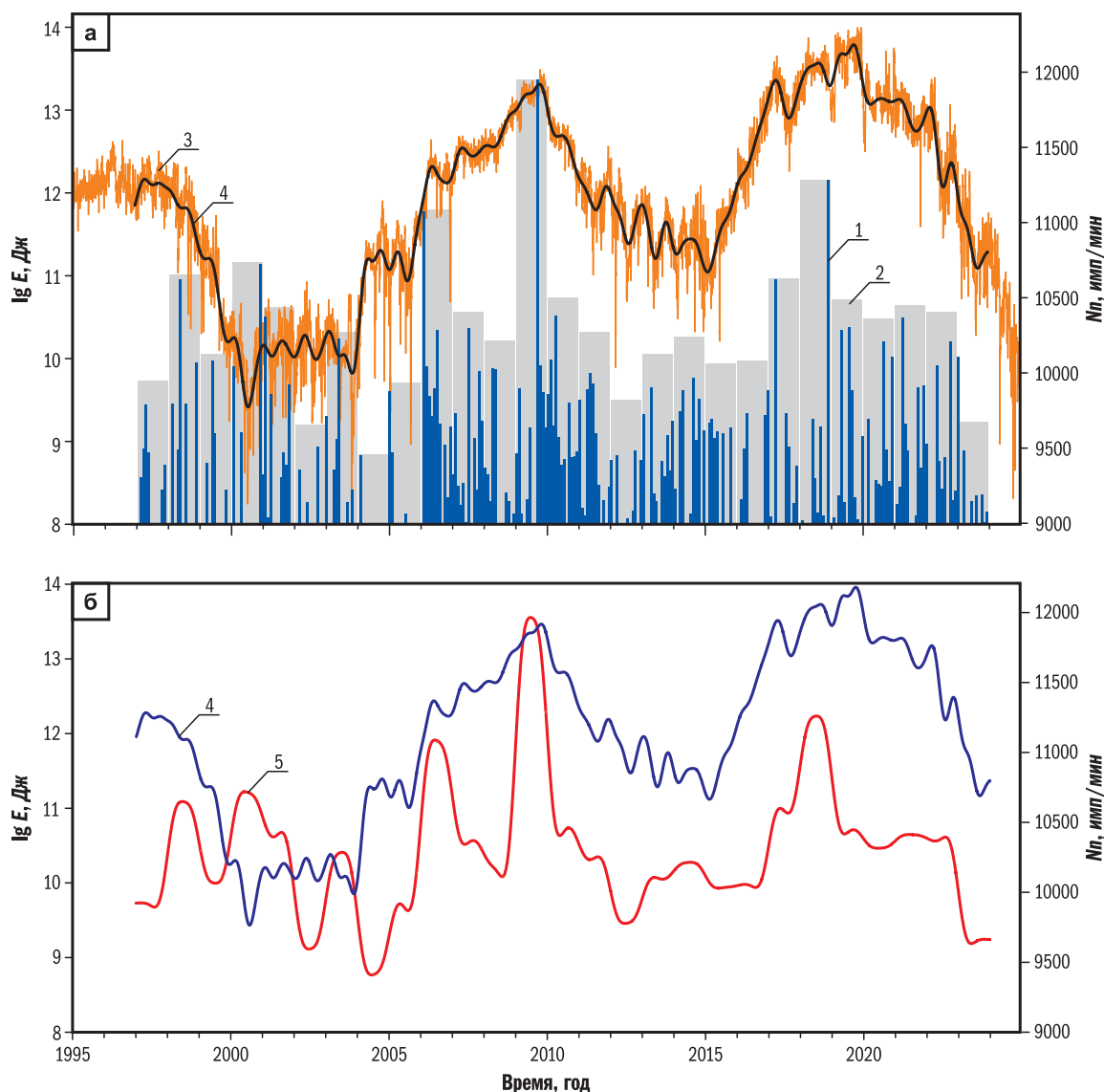


Рис. 5. Вариации  $Np$  и  $E$ .

1 – уровень выделившейся сейсмической энергии за календарный месяц; 2 – уровень выделившейся сейсмической энергии за календарный год; 3 – вариация  $Np$  с 1995 по 2025 г.; 4 – усреднённая вариация  $Np$  в интервале 1997–2023 гг.; 5 – вариация  $E$  как сглаженный полосовым фильтром уровень годовой вариации выделившейся энергии

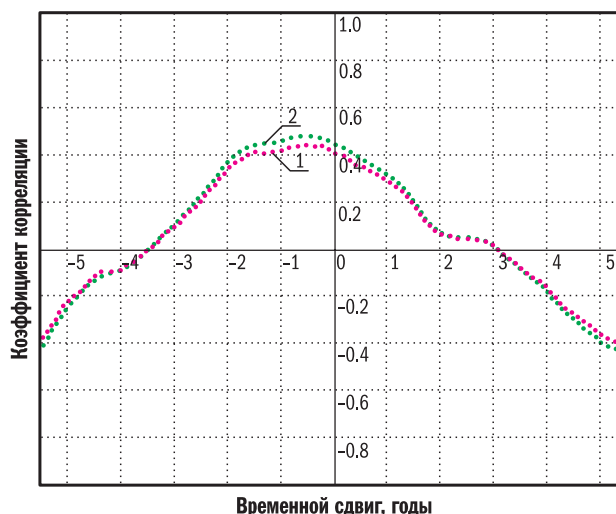


Рис. 6. Результаты корреляционного анализа.

1 – корреляционная функция оригинального ряда  $Np$  и вариации уровня годовой  $E$ ; 2 – корреляционная функция средней  $Np$  и сглаженный уровень годовой вариации  $E$

**Таблица.** Корреляционный анализ вариации  $Nn$  и  $E$ 

Название	Максимальная корреляция	Сдвиг при максимуме корреляционной функции, сут.	Корреляция при «нулевом» сдвиге
Пара I	0.44	–96	0.41
Пара II	0.48	–178	0.45

В таблице отрицательный сдвиг при максимальном значении корреляции означает, что реакция сейсмической активности отстаёт от вариации  $Nn$ .

### Обсуждение результатов

В данной работе СА количественно определялась числом Вольфа ( $W$ ), а интенсивность ГКЛ – темпом счёта нейтронного монитора 24NM-64 станции «Новосибирск» ( $Nn$ ). Вслед за работами [Сытинский, 1989; Yanchukovsky, 2021; Khagai et al., 2021] была подтверждена высокая степень связи  $W$  и  $Nn$ . Коэффициент корреляции при определённой обработке исходных сигналов достигает величины  $r = -0.89$ , что по абсолютной величине незначительно превосходит значения, полученные в приведённых работах. Но кроме этого, установлено, что существует фазовая задержка между вариацией СА и вариацией интенсивности ГКЛ порядка четырёх месяцев.

В качестве меры сейсмической активности была выбрана выделявшаяся энергия. Это означает, что основной вклад в обработку вносят землетрясения с высокой магнитудой. Так, в линейном масштабе (на рис. 5а) были бы видны только три уровня сейсмической энергии: 2006 г. – произошло землетрясение вблизи г. Они 6 февраля с  $M_s = 4.6$  (Онийское-I); 2009 г. – примерно в 10 км южнее Они 7 сентября с  $M_s = 5.8$  (Онийское-II); 2018 г. – 6 ноября с  $M_s = 4.7$ . Все три главных сейсмические события хорошо «вписались» в картину вариации ГКЛ. Основным результат приведён в таблице. Максимальный коэффициент корреляции между сейсмической активностью и ГКЛ, который удалось получить при определённой обработке, достигает  $r = 0.48$ . В качестве дополнительной информации приведём значения корреляции, полученной между сейсмической активностью и  $W$ . Эти значения равны  $r = -0.32$  и  $r = -0.42$  для исходных и усреднённых данных соответственно и задержке реакции сейсмической активности порядка одного года. Полученные результаты (значения коэффициентов корреляции) соответствуют значениям, полученным в приведённых выше работах. Все эти значения лежат в диапазоне абсолютных

величин [0.3–0.5], что трактуется как «умеренная» теснота связи. Но на что хотелось бы обратить особое внимание, это на форму корреляционных функций, изображённых на рис. 6. Форма корреляционной функции нам говорит, что существует только один экстремум, в данном случае максимальное значение, и относительно этого его функция монотонно убывает. Причём можно показать, что это функция квазипериодическая с периодом порядка 11 лет, на котором есть единственный экстремум. Всё это относится и к корреляционной функции, изображённой на рис. 4. Именно форма корреляционных зависимостей подтверждает высокую степень связи исследуемых процессов.

В работе не рассмотрен такой интересный эффект, как зависимость уровня сейсмичности от вариации  $Nn$  [Yanchukovsky, 2021] на фоне Форбуш-понижений СА [Мелкумян и др., 2023]. Авторы считают, что детальный анализ влияния Форбуш-понижений на сейсмичность Рача-Джавской зоны заслуживает отдельной работы.

### Выводы

В приведённой работе для доказательства связи СА и сейсмической активности были выбраны землетрясения лишь в ограниченной в размерах Рача-Джавской консолидированной сейсмической зоне, в отличие от работ [Yanchukovsky, 2021; Khagai et al., 2021], где в обработке применялась сейсмическая активность Земли в целом. Тем не менее, результаты по своим значениям прекрасно совпали. Несомненно, что ГКЛ способны активировать только «подготовленные» сейсмические очаги. Именно по этой причине был ограничен выбор сейсмических событий в данной сейсмической зоне началом 1997 г., так как более ранние землетрясения, согласно [Стогний и др., 2024], были результатом тектонических подвижек и как раз являлись источником «подготовленных» событий. Так, если полностью включить все землетрясения в каталоге в статистическую обработку, то корреляционная функция теряет свойства, описанные выше, и приводить её график не имеет смысла.

Таким образом, действительно в периоды максимума интенсивности ГКЛ (или минимума СА) количество высвобождаемой сейсмической энергии увеличивается за счёт уже «подготовленных» землетрясений, и выполнение этого правила можно наблюдать в ограниченных сейсмически активных районах.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность WDC-SILSO (Royal Observatory of Belgium, Brussels), геофизические данные которых были использованы в данной работе, а также авторы благодарны коллективу NCROC (Новосибирск, Россия) за предоставленные в открытом доступе данные нейтронного монитора 24NM-64 многоканального наблюдательного комплекса космических лучей «Новосибирск».

**Конфликт интересов.** Авторы статьи заявляют, что конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

**Авторский вклад и ответственность.** Все авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

**Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова и государственного задания ФИЦ ЕГС РАН № 075-00609-26) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).**

## Литература

Арефьев С.С., Плетнев К.Г., Татевосян Р.Э. и др. Рачинское землетрясение 1991 г.: результаты полевых сейсмологических наблюдений // Физика Земли. — 1993. — № 3. — С. 12–23. — EDN: WIRQVZ

Габсатарова И.П. Онийское-II землетрясение 7 сентября 2009 г. с  $K_p=14.2$ ,  $MS=5.8$  (Грузия) // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. — Обнинск: ГС РАН, 2015. — С. 325–333. — EDN: WGNFBR

Габсатарова И.П., Борисов П.А. Сильные землетрясения и афтершоковые последовательности Кавказа / Свидетельство о государственной регистрации базы данных RU 2018620251 от 12 февраля 2018 г. — EDN: UBUPPR

Габсатарова И.П., Головкина Л.В., Селиванова Е.А. Онийское землетрясение 6 февраля 2006 г.

с  $MS=5.0$ ,  $I_{op}=6$  (Грузия) // Землетрясения Северной Евразии, 2006 год. — Обнинск: ГС РАН, 2012. — С. 308–313. — EDN: UBTMWF

Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Добровольский И.Н., Нерсенов И.Л. Процессы подготовки, признаки и предвестники коровых землетрясений // Известия АН СССР. Физика Земли. — 1983. — № 2. — С. 59–67.

Захарова А.И., Габсатарова И.П., Старовойт О.Е., Чепкунас Л.С. Основные параметры Рачинского землетрясения и его афтершоков // Физика Земли. — 1993. — № 3. — С. 24–41.

Землетрясения России / Свидетельство о государственной регистрации базы данных RU 2015620591 от 07 апреля 2015 г. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизическая служба Российской академии наук. — URL: <http://eqru.gsras.ru/>. — EDN: AGWGAG

Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Шлык Н.С., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Развитие Форбуш-понижений, связанных с корональными выбросами из активных областей и регионов вне активных областей // Геомагнетизм и аэрномия. — 2023. — Т. 63, № 1. — С. 43–57. — DOI: 10.31857/S0016794022060098. — EDN: АСТКХС

Мясников А.В., Стогний В.В. Короткопериодные компоненты движения полюсов Земли и современная геодинамика // Геология и геофизика Юга России. — 2025. — Т. 15, № 2. — С. 33–49. — DOI: 10.46698/VNC.2025.38.32.001. — EDN: SLMGSD

Новосибирский многоканальный комплекс космических лучей [сайт]. — URL: <http://cosm-rays.ipgg.sbras.ru> (дата обращения 11 августа 2025 г.).

Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л., Гросс С.С. Структура консолидированной земной коры и сейсмичность Центрального сегмента Большого Кавказа // Геология и геофизика Юга России. — 2024. — Т. 14, № 4. — С. 54–65. — DOI: 10.46698/VNC.2024.52.34.006. — EDN: DOTCKD

Сытинский А.Д. О связи землетрясений с солнечной активностью // Известия АН СССР. Физика Земли. — 1989. — № 2. — С. 13–29.

Тихоцкий С.А., Фокин И.В., Шур Д.Ю., Арефьев С.С. Строение очаговой зоны Рачинского землетрясения 1991 г. по данным локальной сейсмической томографии с адаптивной параметризацией среды // Геофизические исследования. — 2011. — Т. 12, № 1. — С. 5–32. — EDN: NQVXKL

Хегай В.В. Эволюция очага и зоны подготовки корового землетрясения: упрощенное феноменологическое описание // Наука и технологические разработки. — 2013. — Т. 92, № 4. — С. 19–30. — EDN: SFWGRB

International Sunspot Number V2.0 // Royal Observatory of Belgium [site]. — URL: <http://sidc.be>

(дата обращения 11 августа 2025 г.). – DOI: 10.24414/qnza-ac80

*Khegai V.V., Legen'ka A.D., Abunin A.A., Abunina M.A., Belov A.V., Gaidash S.P.* Solar activity, galactic cosmic ray variations, and the Global seismicity of the Earth // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2021. – V. 61, Suppl. 1. – P. S36–S47. – DOI: 10.1134/S0016793222010108. – EDN: FZVZPJ

*Mishev A.L., Velinov P.I.Y.* Time evolution of ionization effect due to cosmic rays in terrestrial atmosphere during GLE 70 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2015. – V. 129. – P. 78–86. – DOI: 10.1016/j.jastp.2015.04.016

*Ormsby J.F.* Design of numerical filters with application to missile data processing // *Journal of the Association for Computing Machinery*. – 1961. – V. 8, N 3. – P. 440–466. – DOI: 10.1145/321075.32108

*Pätsi S., Mishev A.* Ionization effect in the Earth's atmosphere due to cosmic rays during the GLE # 71 on 17 May 2012 // *Advances in Space Research*. – 2022. – V. 69, N 7. – P. 2893–2901. – DOI: 10.1016/j.asr.2022.02.008

*Tan O., Taymaz T.* Active tectonics of the Caucasus: Earthquake source mechanisms and rupture his-

stories obtained from inversion of teleseismic body waveforms // *Geological Society of America Special Papers*. – 2006. – V. 409. – P. 531–578. – DOI: 10.1130/2006.2409(25)

*Woessner J., Wiemer S.* Assessing the quality of earthquake catalogs: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2005. – V. 95, N 2. – P. 684–698. – DOI: 10.1785/0120040007

*World Data Center for Solar-Terrestrial Physics // Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences [site]*. – [Moscow: GC RAS, 2025]. – URL: [http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar\\_activity.html](http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar_activity.html) (дата обращения 11.08.2025).

*Yanchukovsky V.L.* Solar activity and Earth seismicity // *Solar-Terrestrial Physics*. – 2021. – V. 7, N 1. – P. 67–77. – DOI: 10.12737/stp-71202109. – EDN: HSMJKQ

*Yazev S.A., Isaeva E.S., Hos-Erdene B.* Solar activity cycle 25: The first three years // *Solar-Terrestrial Physics*. – 2023. – V. 9, N 3. – P. 3–9. – DOI: 10.12737/stp-93202301. – EDN: GBZMQH

#### Сведения об авторах

**Мясников Андрей Владимирович**, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр. Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ), г. Москва, Россия. E-mail: andrey0405@mail.ru

**Дударов Залим Исламович**, науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), г. Обнинск, Россия. E-mail: zalim-dudar@yandex.ru

**Багаева Софья Сергеевна**, нач. сектора Северо-Осетинского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СОФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Владикавказ, Россия. E-mail: sonybag@yandex.ru

## Solar activity, galactic cosmic rays and seismicity of the Racha–Dzhava zone of the Greater Caucasus

© 2026 A.V. Myasnikov<sup>1</sup>, Z.I. Dudarov<sup>2</sup>, S.S. Bagaeva<sup>3</sup>

<sup>1</sup>SAI MSU, Moscow, Russia; <sup>2</sup>GS RAS, Obninsk, Russia; <sup>3</sup>NOB GS RAS, Vladikavkaz, Russia

Received November 19, 2025

**Abstract** The work presents a correlation analysis of the dependence of the level of seismic activity of the Racha–Java zone, located in the Central segment of the Greater Caucasus, and the intensity of galactic cosmic rays according to the neutron monitor. A total of 2,827 seismic events from 1997 to 2023 were processed, which corresponds to 23–25 solar activity cycles. The choice of this interval is related to the fact that almost all seismic activity in this zone is associated with the discharge of stresses that arose after one of the strongest earthquakes in the Caucasus, the Racha earthquake, which occurred on April 29, 1991 ( $M_s=7.0$ ). As a preliminary analysis, it is shown that the intensity of galactic cosmic rays, measured by the counting rate of the neutron monitor in Novosibirsk, is modulated by the level of solar activity, and forms a high, in absolute terms, negative correlation  $r=-0.89$  with a delay of about four months. At the same time, the level of seismic energy output over the specified time interval forms a significant positive correlation  $r=0.48$  with the intensity of galactic cosmic rays with a delay of about one month. Thus, the maximum output of seismic energy from “prepared” earthquakes in one consolidated zone occurs at the minimum of solar activity with a delay of about 10 months and about half a year from the maximum level of intensity of galactic cosmic rays. The analysis of the correlation functions of all pairs of the studied processes showed the presence of a single extremum point, which indicates the high reliability of this relationship.

**Keywords** Solar activity, galactic cosmic rays, atmosphere, seismicity, seismic active zone, elastic recoil theory.

**For citation** Myasnikov, A.V., Dudarov, Z.I., & Bagaeva, S.S. (2026). [Solar activity, galactic cosmic rays and seismicity of the Racha–Dzhava zone of the Greater Caucasus]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 8(1), 72–82. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2026.1.05>. EDN: PKEBBS

### References

- Aref'ev, S.S., Pletnev, K.G., Tatevosyan, R.E., Borisov, B.A., Aptekman, Zh.Ya., Vasil'ev, V.Yu., et al. (1993). [Rachinsk earthquake of 1991: Results of field seismological observations]. *Fizika Zemli* [Physics of the Earth], (3), 12–23. (In Russ.). EDN: WIRQVZ
- Gabsatarova, I.P., & Borisov, P.A. (2018). [Database of the GS RAS “Strong earthquakes and aftershock sequences in the Caucasus”]. Certificate of state registration of database No. 2018620251. (In Russ.). EDN: UBUPPR
- Gabsatarova, I.P., Golovkova, L.V., & Selivanova, E.A. (2012). [Oni earthquake on February 6, 2006 with  $M_s=5.0$ ,  $I_{op}=6$  (Georgia)]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii, 2006 god* [Earthquakes of Northern Eurasia, 2006] (pp. 308–313). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: UBTMWF
- Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. (2025). *World Data Center for Solar–Terrestrial Physics*. Retrieved from [http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar\\_activity.html](http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar_activity.html) (Accessed 11.08.2025).
- Gokhberg, M.B., Gufel'd, I.L., Dobrovol'skiy, I.N., & Nersenov, I.L. (1983). [Preparation processes, signs and precursors of crustal earthquakes]. *Izvestiia AN SSSR. Fizika Zemli* [Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Solid Earth], (2), 59–67. (In Russ.).
- Khegai, V.V., Legen'ka, A.D., Abunin, A.A., Abunina, M.A., Belov, A.V., & Gaidash, S.P. (2021). Solar activity, galactic cosmic ray variations, and the Global seismicity of the Earth. *Geomagnetism and Aeronomy*, 61(1), S36–S47. DOI: [10.1134/S0016793222010108](https://doi.org/10.1134/S0016793222010108). EDN: FZVZPJ
- Khegay, V.V. (2013). [Evolution of the focal and nucleation areas of crustal earthquakes: A simplified phenomenological description]. *Nauka i tekhnologicheskie razrabotki* [Science and Technological Developments], 92(4), 19–30. (In Russ.).
- Melkumyan, A.A., Belov, A.V., Abunina, M.A., Shlyk, N.S., Abunin, A.A., Oleneva, V.A., & Yanke, V.G. (2023). [Development of Forbush depressions associated with coronal emissions from active areas and regions outside active areas]. *Geomagnetizm i aeronomiia* [Geomag-

- netism and Aeronomy], 63(1), 43-57. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0016794022060098. EDN: АСТКХС
- Mishev, A.L., & Velinov, P.I.Y. (2015). Time evolution of ionization effect due to cosmic rays in terrestrial atmosphere during GLE 70. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 129, 78-86. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.04.016
- Myasnikov, A.V., & Stogniy, V.V. (2025). [Short-period components of the Earth's polar motion and modern geodynamics]. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii* [Geology and Geophysics of Russian South], 15(2), 33-49. DOI: 10.46698/VNC.2025.38.32.001. (In Russ.).
- Novosibirsk Cosmic Ray observation complex*. (2025). Retrieved from <http://cosm-rays.ipgg.sbras.ru> (In Russ.). (Accessed 11.08.2025).
- Ormsby, J.F. (1961). Design of numerical filters with application to missile data processing. *Journal of the association for computing machinery*, 8(3), 440-466. DOI: 10.1145/321075.32108
- Pätsi, S., & Mishev, A. (2022). Ionization effect in the Earth's atmosphere due to cosmic rays during the GLE # 71 on 17 May 2012. *Advances in Space Research*, 69(7), 2893-2901. DOI: 10.1016/j.asr.2022.02.008
- Royal Observatory of Belgium. (2025). *International Sunspot Number V2.0*. Retrieved from <http://sidc.be> (Accessed 11.08.2025). DOI: 10.24414/qnza-ac80
- Stogniy, V.V., Stogniy, G.A., Ponomareva, N.L., & Gross, S.S. (2024). [Structure of Earth's consolidated crust and seismicity of the Greater Caucasus central segment]. *Geologiya i geofizika Iuga Rossii* [Geology and Geophysics of Russian South], 14(4), 54-65. (In Russ.). DOI: 10.46698/VNC.2024.52.34.006. EDN: DOTCKD
- Sytinsky, A.D. (1989). [On the relationship of earthquakes with solar activity]. *Izvestiia AN SSSR. Fizika Zemli* [Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Solid Earth], (2), 13-29. (In Russ.).
- Tan, O., & Taymaz, T. (2006). Active tectonics of the Caucasus: Earthquake source mechanisms and rupture histories obtained from inversion of teleseismic body waveforms. *Geological Society of America Special Papers*, 409, 531-578. DOI: 10.1130/2006.2409(25)
- Tikhotskiy, S.A., Fokin, I.V., Shur, D.Yu., & Aref'ev, S.S. (2011). [Structure of the source area of the Racha earthquake (1991) from local seismic tomography with adaptive media parameterization]. *Geofizicheskie issledovaniia* [Geophysical Research], 12(1), 5-32. (In Russ.). EDN: NQVXKL
- Woessner, J., & Wiemer, S. (2005). Assessing the quality of earthquake catalogs: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(2), 684-698. DOI: 10.1785/0120040007
- Yanchukovsky, V.L. (2021). Solar activity and Earth seismicity. *Solar-Terrestrial Physics*, 7(1), 67-77. DOI: 10.12737/stp-71202109. EDN: HSMJKQ
- Yazev, S.A., Isaeva, E.S., & Hos-Erdene, B. (2023). Solar activity cycle 25: The first three years. *Solar-Terrestrial Physics*, 9(3), 3-9. DOI: 10.12737/stp-93202301. EDN: GBZMQH
- Zakharova, A.I., Gabsatarova, I.P., Starovoit, O.E., & Chepkunas, L.S. (1993). [The main parameters of the Racha earthquake and its aftershocks]. *Fizika Zemli* [Physics of the Solid Earth], (3), 24-41. (In Russ.).
- Zemletriaseniia Rossii* [Earthquakes in Russia]. (2015). Certificate of state registration of database No. 2015620591 dated April 07, 2015. Retrieved from <http://eqru.gsras.ru/>. (In Russ.). EDN: AGWGAG
- Gabsatarova, I.P. (2015). [Oni-II earthquake on September 7, 2009 with  $K_R=14.2$ ,  $M_s=5.8$  (Georgia)]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii, 2009 god* [Earthquakes of Northern Eurasia, 2009] (pp. 325-333). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: WGNFBR

### Information about authors

**Myasnikov Andrey Vladimirovich**, PhD, Researcher of the P.K. Sternberg State Astronomical Institute of the Lomonosov Moscow State University (SAI MSU), Moscow, Russia. E-mail: andrey0405@mail.ru

**Dudarov Zalim Islamovich**, Researcher of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS), Obninsk, Russia. E-mail: zalim-dudar@yandex.ru

**Bagaeva Sofya Sergeevna**, Head of the Seismic Information Processing Sector of the North-Ossetian Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (NOB GS RAS), Vladikavkaz, Russia. E-mail: sonybag@yandex.ru