

СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЗЕМЛИ И ГАЛАКТИЧЕСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ: ГЛОБАЛЬНЫЕ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В 21–24-м ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2022 г. В. В. Хегай¹, А. А. Абуни¹ *, М. А. Абунина¹ **, А. В. Белов¹

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

*e-mail: abunin@izmiran.ru

**e-mail: abunina@izmiran.ru

Поступила в редакцию 22.02.2022 г.

После доработки 04.04.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

Показано, что в интервале с 2007 по 2011 г. число сильных (магнитуда $M \geq 5.0$) коровых (глубина гипоцентра $0 \leq h \leq 60$ км) землетрясений в году $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$, принятое как мера глобальной интенсивности сейсмической активности Земли, значительно превосходит верхнюю границу уровня в два стандартных отклонения от среднего, рассчитанного с 1973 по 2019 г. (21–24-й циклы солнечной активности), и максимальное относительное отклонение (в 2011 г.) от него составляет $\approx 78\%$. Такая ситуация наблюдается в конце 23 и начале 24-го циклов солнечной активности. Указанный временной промежуток характеризуется максимальной интенсивностью галактических космических лучей на расстоянии 1 а. е. вне магнитосферы Земли на фиксированной жесткости 10 ГВ за весь период наблюдений (с пятидесятих годов прошлого столетия по настоящее время), а величина относительной интенсивности галактических космических лучей (δ_{Year}) существенно выше средней и является самой высокой за все время наблюдения, вычисленной на интервале с 21-го по 24-й цикл солнечной активности.

DOI: 10.31857/S0016794022050054

1. ВВЕДЕНИЕ

Оценка сейсмической активности Земли (САЗ) может быть произведена различным образом. Так, в работе [Шестопапов и Харин, 2004], проводится оценка по величине выделяющейся при землетрясении энергии в зависимости от его магнитуды. При этом энергия землетрясений вычисляется по формуле: $\lg E = 11.8 + 1.5Ms$ (эрг) для землетрясений, эпицентры которых находятся на глубине меньше 100 км, и по формуле: $\lg E = 5.8 + 2.4mb$ для землетрясений, эпицентры которых находятся на глубине больше 100 км (здесь E – величина выделяющейся при землетрясении энергии в эрг, а Ms и mb – магнитуды землетрясений соответствующего типа в безразмерных единицах), а затем определяется суммарная энергия за выбранный промежуток времени (как правило, год).

В статьях [Барляева и др., 2000; Хегай и др., 2022] в качестве количественной меры САЗ выступает суммарное число землетрясений за год, превышающих по магнитуде (M) некоторый заданный уровень, $N_{EQ/Year}(M \geq 7.0)$ и $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$ в первой и второй из перечисленных работ соответственно. В том и другом случае речь идет о

сильных землетрясениях. В работах [Сытинский, 1989; Белов и др., 2009] используются оба типа оценки САЗ, адаптированные к конкретным целям проведенных исследований.

В этом исследовании в качестве меры интенсивности САЗ принята та же оценка, что и в работе [Хегай и др., 2022], т.е. число сильных (с магнитудой $M \geq 5.0$) коровых (глубина гипоцентра $0 \leq h \leq 60$ км) землетрясений в году, $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$. Там же дано подробное обоснование такого выбора.

Так же, как и в работе [Хегай и др., 2022], в качестве меры солнечной активности (СА) в настоящей работе принят (вместо чисел Вольфа – W) суммарный годовой поток (как сумма среднемесячных его значений) солнечного излучения на длине волны 10.7 см ($F10.7_{Year}$, sfu), интегрально характеризующий уровень СА на временном интервале с 21-го по 24-й цикл СА (с 1973 по 2019 г.).

Как указано в работе [Белов и др., 2021], галактические космические лучи (ГКЛ), вплоть до жесткостей ~ 100 ГВ, постоянно модулируются солнечным ветром. Эта модуляция наблюдается и наземными детекторами (мюонными телескопа-

ми и нейтронными мониторами). Чтобы получить изменения первичных ГКЛ, должна быть решена обратная задача – восстановление характеристик вариаций ГКЛ за пределами магнитосферы Земли. Именно такую задачу и решает метод глобальной съемки (см. подробное описание метода в работах [Белов и др., 2018; Belov et al., 2018]).

Таким образом, интенсивность потока ГКЛ на указанном выше временном интервале в настоящей работе оценивается двояким образом. Во-первых, на поверхности Земли, для указанного далее ряда станций наблюдения в различных регионах Земли в абсолютных единицах, как усредненная с годовым разрешением скорость счета детекторов I_{GCR} (имп/с) по данным мировой сети нейтронных мониторов – NMDB (Neutron Monitor Database (<https://www.nmdb.eu/nest/>)). Во-вторых (в относительных единицах), как среднегодовая вариация интенсивности ГКЛ (δ_{Year} , %), характеризующая интенсивность изотропной составляющей потока ГКЛ:

$$\delta_{Year} = 100 \times [\langle A_0 \rangle_{Year} - \langle A_0 \rangle_{2009}] / \langle A_0 \rangle_{2009}, \quad (1)$$

здесь A_0 – амплитуда вариации интенсивности ГКЛ на фиксированной жесткости 10 ГВ вне атмосферы и магнитосферы Земли на расстоянии 1 а. е., полученная методом глобальной съемки по данным всей мировой сети нейтронных мониторов. В качестве базового периода для нормировки выбран 2009 г., когда наблюдалось максимальное значение величины $\langle A_0 \rangle$. С математической точки зрения, величина A_0 есть амплитуда нулевой гармоники вариации интенсивности ГКЛ (см. работу [Белов и др., 2018], уравнение 7), полученная в результате разложения этой интенсивности по сферическим гармоникам (см., напр., монографию [Yasue et al., 1982]). Именно эта вариация представлена в работе [Белов и др., 2021] с более высоким временным разрешением в сопоставлении с прямыми измерениями на космических аппаратах (см. [Белов и др., 2021], рис. 2). Забегая вперед, сразу отметим здесь, что наиболее высокая интенсивность ГКЛ наблюдается на расстоянии 1 а. е. от Земли в интервале 2008–2011 гг., что хорошо видно из этого рисунка.

Обычно отмечают умеренную антикорреляцию САЗ и СА на временных интервалах различной длительности (см. работы [Сытинский, 1989; Шестопапов и Харин, 2004; Белов и др., 2009; Хегай, 2018]). Однако, в исследовании [Хегай и др., 2022] было показано, что (в интервале с 21-го по 24-й цикл СА) при рассмотрении СА и ГКЛ как независимых факторов, формирующих САЗ, для соответствующих коэффициентов корреляции (ρ) выполняется неравенство (p – уровень значимости): $|\rho(N_{EQ/Year}, \delta_{Year})|_{p < 0.05} = 0.459 > |\rho(N_{EQ/Year}, F10.7_{Year})|_{p < 0.05} = 0.414$, т.е. теснота связи между

САЗ и интенсивностью ГКЛ (при прямой корреляции) больше, чем между САЗ и СА (при антикорреляции) на изученном интервале времени для массива сильных землетрясений с $M \geq 5.0$. Таким образом, акцент смещается в сторону ГКЛ, с точки зрения одной из возможных первичных причин, определяющих общую интенсификацию САЗ. Концептуально, авторы исследования [Хегай и др., 2022] поддерживают и детализируют далее “сценарий”, развитый в работах [Сытинский, 1989; Барляева и др., 2000; Боков и Сытинский, 2002; Сытинский и др., 2003; Боков, 2011; Боков и др., 2011; Боков и Воробьев, 2014; Боков и Воробьев, 2016], подчеркивая при этом связь между мощностью облачности и мощностью (или увеличением количества) основных барических структур тропосферы – циклонов и антициклонов при росте интенсивности ГКЛ.

Механизмы формирования облачности, обусловленные воздействием энергичных частиц на земную атмосферу, также как и проблемы, связанные с этим вопросом, достаточно подробно описаны в обзорной работе [Mironova et al., 2015] (частично некоторые аспекты, корреляционных связей, наблюдаемых между аномалиями нижней облачности и потоками ГКЛ, обсуждаются также в работе [Хегай и др., 2022]). Как следует из работы [Mironova et al., 2015], в одном из обсуждаемых механизмов, обусловленном именно воздействием потоков ГКЛ, работает так называемый эффект “чистого воздуха” (“clear-air” effect). Согласно ему, ионизация, вызванная космическими лучами (cosmic ray induced ionization – CRII), генерирует новые сверхмелкие аэрозольные частицы. Эти частицы и служат ядрами конденсации облаков (cloud condensation nuclei – CCN), которые способствуют облакообразованию. Указанный эффект действительно наблюдается в эксперименте (см. Table 5 этой работы). Более подробно этот механизм изложен в работе [Carslaw et al., 2002].

Кроме того, в работе [Svensmark and Friis-Christensen, 1997] на основе анализа спутниковых данных ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project, [<http://isccp.giss.nasa.gov/>]) было получено, что общая облачность испытывает 11-летнюю вариацию, развиваясь в фазе с интенсивностью ГКЛ. Наконец, авторы [Marsh and Svensmark, 2000] обнаружили, что с вариациями потока ГКЛ наиболее тесно связано изменение площади облаков *нижнего яруса*. В указанной работе были приведены достаточно высокие коэффициенты корреляции между усредненными по земному шару аномалиями нижней облачности (по данным архива ISCCP-D2) и скоростью счета нейтронного монитора в Уанкайо для периода 1983–1994 гг. ($R = 0.63$ для несглаженных значений и $R = 0.92$ – для скользящих средних по 12 мес.), т.е.

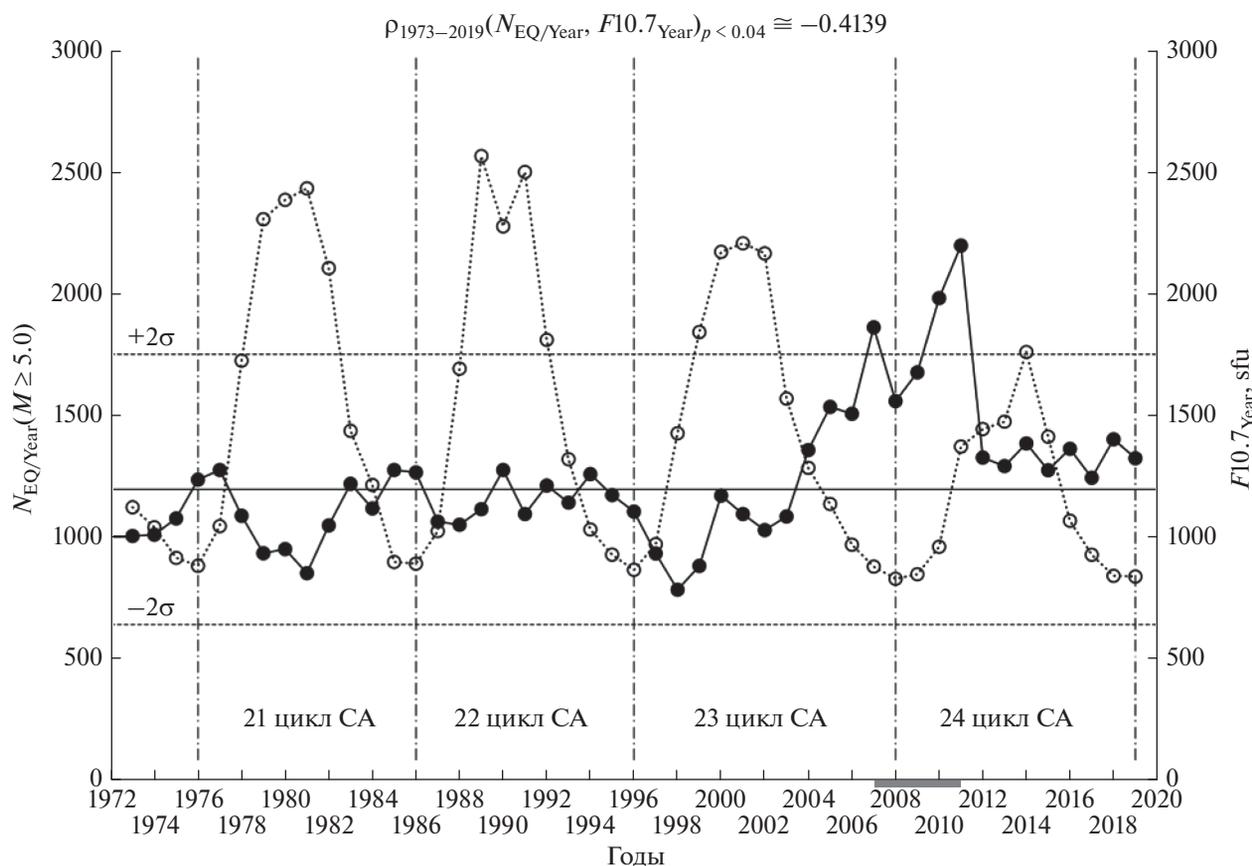


Рис. 1. Картина глобального распределения количества землетрясений по годам $N_{EQ}/Year (M \geq 5.0)$ (левая ось ординат, сплошная линия, затемненные кружки) и $F10.7_{Year}$ (правая ось ординат, точечная линия, незатемненные кружки) на временном интервале с 1973 г. по 2019 г. Границы циклов СА обозначены вертикальными штрихпунктирными линиями. Над рисунком приведен коэффициент линейной корреляции ρ . Временной промежуток, характеризующийся максимальной интенсивностью ГКЛ на расстоянии 1 а. е. вне магнитосферы Земли на фиксированной жесткости 10 ГВ отмечает затемненный прямоугольник под осью абсцисс.

с конца **21** почти до конца **22-го** цикла СА (см. Fig. 1(c) этой работы).

Если общая площадь облачности глобально возрастает при более высоких величинах интенсивности ГКЛ, то увеличивается вероятность успешного (для активации “созревших” очагов землетрясения, см. [Боков, 2011]) перекрытия (при благоприятном режиме атмосферной циркуляции) областей активных разломов земной коры (и прилегающих к ним зон сильных землетрясений) с областями возникающих более мощных основных барических структур атмосферы (циклонов и антициклонов с более мощной облачностью) или ростом их количества. При условии, что в этих областях уже существуют очаги “созревших” сильных землетрясений, такое перекрытие будет “провоцировать” подземные толчки, в соответствии со “сценарием”, предложенным в работах [Барляева и др., 2000; Боков, 2011; Боков и др., 2011]. Согласно этому “сценарию”, быстрые смещения крупных воздушных масс уве-

личивают или снимают нагрузки на земную кору и приводят к ее деформации. Образовавшиеся дополнительные деформации коры между геоблоками служат спусковым механизмом землетрясений, которые уже предварительно подготовлены эндогенными процессами. При этом активизация очага уже “созревшего” землетрясения решающим образом зависит от коллинеарности границы между областями высокого (антициклональной) и низкого (циклонической) давлений с ориентацией разлома. Оптимально для этого процесса необходимо, чтобы линия нулевой барической нагрузки проходила вдоль активного разлома, вертикальная проекция вблизи некоторой точки которого на поверхность Земли будет соответствовать эпицентру инициируемого землетрясения (см. рис. 8 статьи [Боков, 2011]). Кроме этого, необходимо также, чтобы перепад давления в атмосферных барических образованиях нужным образом соответствовал напряжениям на границах блоков разлома, только в этом случае он может стать триггером подземного толчка. В пользу

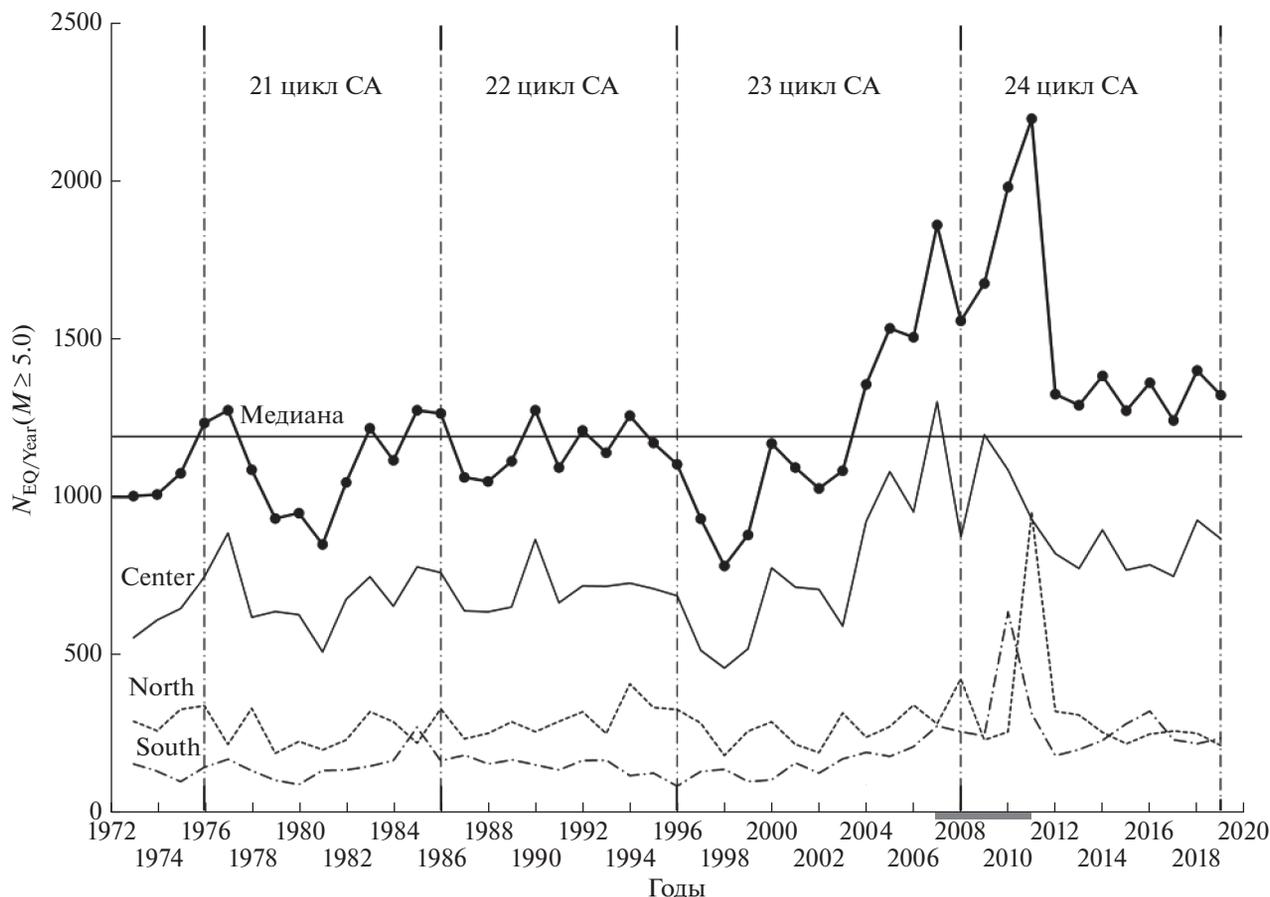


Рис. 2. Распределение сейсмических событий $N_{EQ}/Year (M \geq 5.0)$ с 21 по 24 цикл СА: глобально (сплошная толстая линия с точками), в зонах S_{Center} (сплошная линия), S_{North} (штриховая линия) и S_{South} (штрихпунктирная линия). Сплошная горизонтальная линия отмечает медиану глобального распределения сейсмических событий, а границы циклов СА показаны вертикальными штрихпунктирными линиями. Интервал, когда поток ГКЛ на расстоянии 1 а. е. вне магнитосферы Земли на фиксированной жесткости 10 ГВ особенно интенсивен, отмечен затемненным прямоугольником под осью абсцисс.

развития именно такого “сценария” свидетельствуют и выводы работы [Соболев и Закржевская, 2020], основанные на изучении за период 2000–2017 гг. записей широкополосной сейсмической станции ААК системы IRIS, расположенной в районе Тянь-Шаня. Анализ этих записей дал возможность авторам сделать вывод о том, что статистически не случайное совпадение аномалий сейсмического шума и землетрясений совпадало с увеличением амплитуды вариаций атмосферного давления. Авторы этого исследования указывают также в заключении, что перемещения крупных воздушных масс приводят к изменению сил гравитации, и при этом не исключено инициирование как медленных подвижек (тектонических аномалий), так и динамических разрывов (землетрясений) в разломах, находящихся в условиях неустойчивого равновесия. Таким образом, возрастает и собственно роль крупных облачных воздушных массивов, в формировании которых задействованы потоки ГКЛ. В пользу этого сви-

детельствуют следующие положения, представленные в работе [Carslaw et al., 2002]): во-первых, эффект космических лучей может вызывать *небольшие* изменения в увеличении концентрации аэрозолей, способствующих образованию облаков, но в *глобальном масштабе*; во-вторых, воздействие космических лучей, вероятно, будет наиболее эффективным в *регионах с низкой концентрацией аэрозоля*, таких как чистые районы над океанами.

В результате глобально будет наблюдаться прямая умеренная корреляция между количеством сильных землетрясений в году $N_{EQ}/Year$ и интенсивностью ГКЛ, которая количественно выражается параметром δ_{Year} в проведенном исследовании [Хегай и др., 2022]. Именно этот (вероятностный, но каузальный) аспект корреляции между САЗ и интенсивностью ГКЛ важен для представленного ниже исследования. При этом следует помнить, что описанный выше сценарий

будет вносить лишь какую-то долю в общую САЗ и может быть далеко не единственным внешним “триггером” сильных землетрясений, очаги которых “созревают” в результате эндогенных процессов внутри Земли.

Таким образом, целью настоящего исследования является рассмотрение количественных характеристик САЗ в свете их связи с интенсивностью ГКЛ в 21–24-м циклах СА, с учетом регионального характера САЗ, обусловленного “привязкой” очагов сильных землетрясений к крупномасштабным тектоническим разломам земной коры. Сразу же отметим здесь, что глобально САЗ в 24-м цикле СА оказывается существенно выше (в особенности в его начале) по сравнению со всеми другими циклами СА, рассмотренными в данной работе.

Данные по величине среднего за месяц потока $F_{10.7}$ (в sfu – *solar flux units*) с января 1973 по февраль 2015 г. были взяты с интернет-ресурса (https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/noontime-flux/penticton/penticton_averaged/) NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI), USA, а с февраля 2015 по декабрь 2019 г. – с электронного адреса (<https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>) Space Weather Prediction Center National Oceanic and Atmospheric Administration, USA. Данные по землетрясениям получены из каталога Национального Центра информации о землетрясениях Геологической службы США (NEIC, USGS (<https://www.usgs.gov/>)) с 1973 г. по 2019 г.

2. ГЛОБАЛЬНАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ САЗ С 21-ГО ПО 24-Й ЦИКЛ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

На рисунке 1 представлена картина глобально-го распределения количества землетрясений по годам $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$ (левая ось ординат, сплошная линия, затемненные кружки) и суммарный годовой поток (как сумма среднемесячных его значений) солнечного излучения на длине волны 10.7 см $F_{10.7Year}$ (правая ось ординат, пунктирная линия, незатемненные кружки) на временном интервале с 1973 по 2019 г. (границы циклов СА обозначены вертикальными штрихпунктирными линиями). Для этой пары параметров статистически значимый (с уровнем значимости $p < 0.004$ в соответствии со статистикой Стьюдента) коэффициент линейной корреляции $\rho_{1973-2019}(N_{EQ/Year}, F_{10.7Year})_{p < 0.004} = -0.4139$ (см. также работу [Хегай и др., 2022]), т. е. наблюдается антикорреляция с “умеренной” теснотой связи между $N_{EQ/Year}$ и $F_{10.7Year}$ на этом временном отрезке.

Сплошная горизонтальная линия отмечает среднее значение $\langle N_{EQ/Year}(M \geq 5.0) \rangle$ на представ-

ленном временном промежутке, а горизонтальные штриховые линии – уровни $\pm 2\sigma$ (где σ – стандартное отклонение) соответственно. Хорошо видно, что в интервале с 2007 по 2011 г. (отмечен затемненным прямоугольником под осью абсцисс) $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$ значительно выходит за границу уровня $+2\sigma$, при этом максимальное отклонение (в 2011 г.) от среднего составляет $\approx 78\%$. Такая ситуация наблюдается в конце 23 и начале 24-го циклов СА. При этом, как уже было сказано выше во Введении, указанный временной промежуток характеризуется максимальной интенсивностью ГКЛ на расстоянии 1 а. е. вне магнитосферы Земли на фиксированной жесткости 10 ГВ за весь период наблюдений (с пятидесятих годов прошлого столетия по настоящее время, см. рис. 2 работы [Белов и др., 2021]).

Подробные морфологические характеристики представленных на рисунке циклов СА даны в работе [Ишков, 2013]. В указанной работе 21 и 22-й циклы СА относятся к циклам достоверной эпохи “повышенной” СА (длительность которых составляет 10.2 и 9.6 лет соответственно), 23-й цикл отнесен к достоверному периоду перестройки СА, который длится 12.7 года, а 24-й цикл является циклом достоверной эпохи “пониженной” СА с длительностью 11.3 г. В этой работе уровень СА традиционно оценивается с помощью чисел Вольфа (W). Так как в нашем исследовании уровень СА оценивается с помощью энергетического параметра – суммарного годового потока солнечного излучения на длине волны 10.7 см ($F_{10.7Year}$, sfu), т. е. с разрешением в один год, то длительность соответствующих циклов СА (см. рис. 1): $T_{21} = T_{22} \cong 10$ лет, $T_{23} \cong 12$ лет и $T_{24} \cong 11$ лет, что близко к данным работы [Ишков, 2013]. Таким образом, самым “длинным” из представленных на рис. 1 является 23-й цикл СА – цикл достоверного периода перестройки СА. Именно в его конце наблюдается первый “всплеск” САЗ, превосходящий уровень $+2\sigma$, при этом на участке в 5 лет (с 2007 по 2011 г. включительно) медиана САЗ $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)_{med(2007-2011)}$ превосходит медиану САЗ за весь представленный период $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)_{med(1973-2019)}$ на $\cong 54\%$.

Итак, при оценке глобальной САЗ можно сделать вывод, что в течение рассмотренных достоверных циклов СА, максимальный уровень САЗ наблюдается в интервале с 2007 по 2011 г., и этот уровень превосходит верхнюю границу разброса $+2\sigma$ от среднего значения $\langle N_{EQ/Year}(M \geq 5.0) \rangle_{1973-2019}$, вычисленного на интервале 1973–2019 гг., т. е. $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)_{2007, 2010, 2011} > \langle N_{EQ/Year}(M \geq 5.0) \rangle_{1973-2019} + 2\sigma$.

Теперь, для того чтобы оценить временное поведение региональной САЗ, поступим следующим образом. Определим сначала область центральной зоны поверхности Земли (Center) как

внутреннюю часть ее поверхности, ограниченную географическими параллелями на широтах $\varphi = \pm 30^\circ$, тогда площадь поверхности такого шарового пояса сферы с радиусом Земли (R_3) окажется равной $S_{Center} = 2\pi R_3^2$. Соответственно, часть площади поверхности Земли (лежащая к северу от географической широты $\varphi = +30^\circ$) $S_{North} = \pi R_3^2$, так же как (лежащая к югу от географической широты $\varphi = -30^\circ$) и $S_{South} = \pi R_3^2$. Очевидно, что $S_{North} = S_{South}$ и $S_{Center} = S_{North} + S_{South}$. Распределение числа землетрясений $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$ по годам с 21-го по 24-й цикл СА глобально и по указанным выше зонам земной поверхности иллюстрирует рис. 2. Глобальное распределение сейсмических событий на рисунке дано сплошной толстой линией с точками, землетрясения зоны S_{Center} отмечает сплошная линия, а количество землетрясений, произошедших в зонах S_{North} и S_{South} , показано штриховой и штрихпунктирной линиями соответственно. Сплошная горизонтальная линия отмечает медиану глобального распределения сейсмических событий (для удобства восприятия), а границы циклов СА показаны вертикальными штрихпунктирными линиями. Хорошо видно, что в основном, землетрясения происходят в центральной зоне, а усредненное за 1973–2019 гг. отношение $\langle \{N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)_{North} + N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)_{South}\} / N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)_{Center} \rangle_{1973-2019} \cong 0.65$.

Таким образом, в среднем, суммарное количество землетрясений северной и южной зон составляет 65% от их количества, произошедших в центральной зоне. Исключение составляет лишь 2011 г., когда это отношение равно $\cong 1.36$ и суммарное число землетрясений северной и южной зон превосходит число землетрясений, случившихся в центральной зоне. Укажем здесь также на существенное преобладание числа землетрясений в южной зоне над их числом в северной в 2010 г. (обычно – наоборот). Отмеченные особенности наблюдаются в начале 24-го цикла СА и в пределах того же интервала (отмечен как затемненный прямоугольник под осью абсцисс), когда поток ГКЛ на расстоянии 1 а. е. вне магнитосферы Земли на фиксированной жесткости 10 ГВ особенно интенсивен. На этом же временном промежутке повышено и количество землетрясений центральной зоны. Следует отметить, что именно в области центральной зоны сосредоточены траектории основной массы тропических циклонов, что хорошо видно из рис. 3 работы [Ким и др., 2006], на котором приведено глобальное распределение траекторий тропических циклонов, построенное по данным базы “ГЛОБАЛ-ТЦ” за 22 года.

3. ВАРИАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОТОКА ГКЛ С 21-ГО ПО 24-Й ЦИКЛ СА И ГЛОБАЛЬНАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗЕМЛИ

Как уже было сказано во Введении, интенсивность ГКЛ оценивается в этом исследовании, во-первых, на поверхности Земли (усредненная с годовым разрешением скорость счета детекторов I_{GCR} (имп/с) по данным сети нейтронных мониторов (НМ), взятых из NMDV), а во-вторых – по изменениям определенной выше относительной вариации δ_{Year} на фиксированной жесткости 10 ГВ вне атмосферы и магнитосферы Земли на расстоянии 1 а. е., полученной методом глобальной съемки.

Величина I_{GCR} интенсивности ГКЛ на поверхности Земли, полученная методом наложения “эпох” [Дорман, 1972] по 5 станциям регистрации ГКЛ на поверхности Земли сети НМ (см. табл. 1) определялась как

$$I_{GCR} = [\langle I \rangle_{THUL} + \langle I \rangle_{OULU} + \langle I \rangle_{KERG} + \langle I \rangle_{NEWK} + \langle I \rangle_{HRMS}] / 5, \quad (2)$$

при этом $\langle I \rangle$ – усредненная за год по часовым данным скорость счета (в имп/с) на соответствующей станции регистрации ГКЛ (начало “эпохи” – 1973 г., конец – 2019 г.). Кроме этого, рассматривалась величина $I_{TSMB} \equiv \langle I \rangle_{TSMB}$ для единственной станции, попадающей в центральную зону (Center, жесткость $R = 9.15$ ГВ), данные для которой имеются для временного интервала 1976–2019 гг.

На рисунке 3 представлены временные развертки поведения $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$ (нижняя панель, сплошная линия с точками), I_{GCR} (верхняя панель, сплошная линия с “открытыми” кружками) и I_{TSMB} (верхняя панель, сплошная линия) с разрешением в один год. На обеих панелях сплошные горизонтальные линии отмечают средние значения соответствующей величины, а штриховые горизонтальные линии – уровни отклонения на величину $\pm 2\sigma$ для $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$ и $\pm 1.5\sigma$ (для I_{GCR} и I_{TSMB}) соответственно. Над верхней панелью приведены соответствующие парам величин линейные коэффициенты корреляции на указанных временных интервалах и уровнем значимости p по статистике Стьюдента, а интервал 2007–2011 гг., когда наблюдаются превышения верхних границ соответствующих отклонений, отмечен затемненным прямоугольником под осью абсцисс нижней панели. Границы циклов СА показаны вертикальными штрихпунктирными линиями.

Из рисунка видно, что по абсолютным измерениям интенсивности ГКЛ на поверхности Земли на группе станций сети NMDV в интервале 2007–2011 гг. наблюдаются превышения верхних границ соответствующих отклонений, которые совпадают с превышением на этом же временном

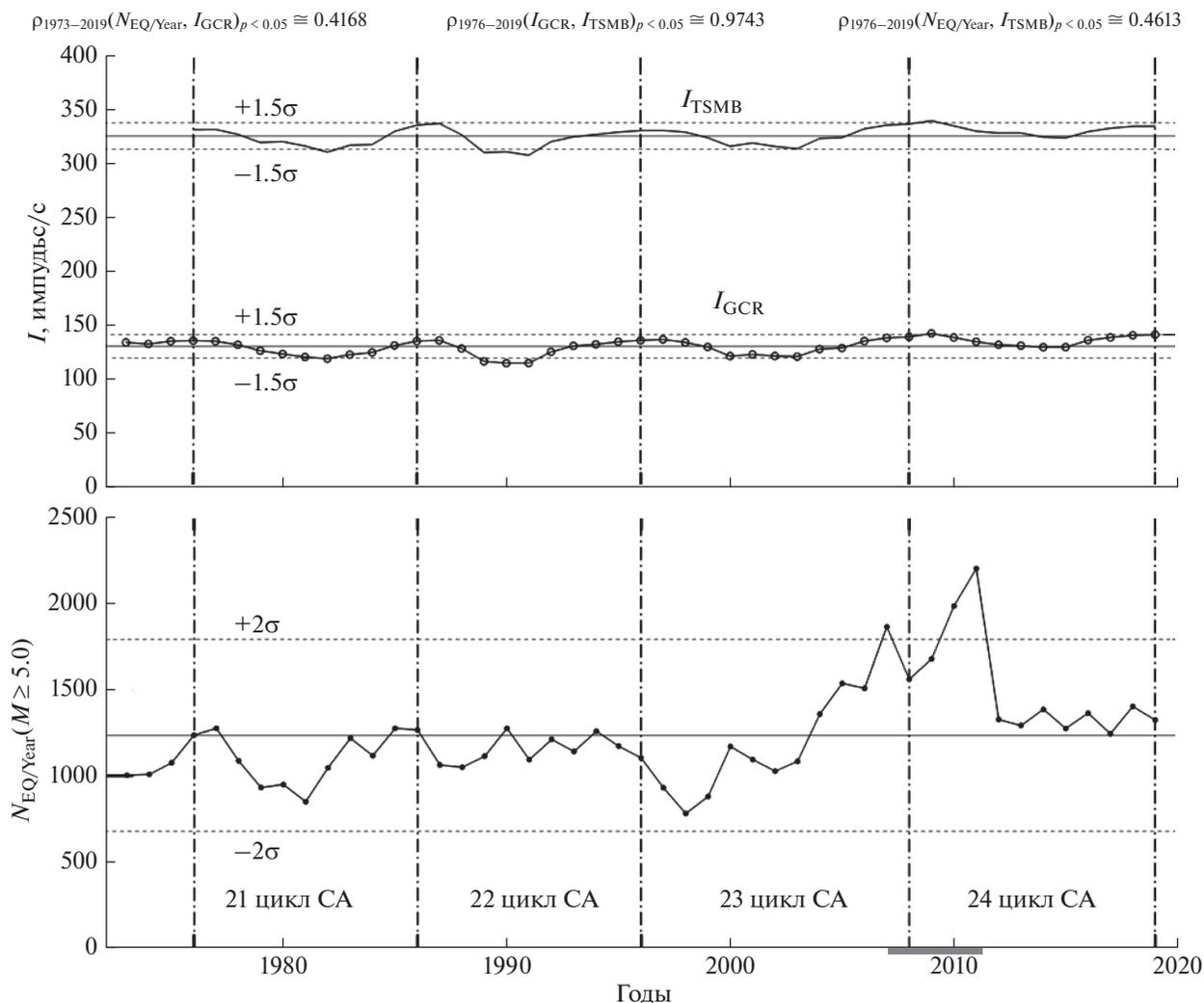


Рис. 3. Временные вариации $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$ (нижняя панель, сплошная линия с точками), I_{GCR} (верхняя панель, сплошная линия с “открытыми” кружками) и I_{TSMB} (верхняя панель, сплошная линия) с разрешением в один год. Над верхней панелью приведены соответствующие парам величин линейные коэффициенты корреляции на указанных временных интервалах. Интервал 2007–2011 г., когда наблюдаются превышения верхних границ соответствующих отклонений, отмечен затемненным прямоугольником под осью абсцисс нижней панели, а границы циклов солнечной активности показаны вертикальными штрихпунктирными линиями.

интервале уровня $\langle N_{EQ/Year}(M \geq 5.0) \rangle_{1973-2019} + 2\sigma$ в поведении $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$. При этом $\rho_{1973-2019}(N_{EQ/Year}, I_{GCR})_{p < 0.05} \cong 0.4168 > |\rho_{1973-2019}(N_{EQ/Year}, F_{10.7Year})_{p < 0.05}| \cong 0.4139$, т.е. связь интенсивности ГКЛ с САЗ (при прямой корреляции) и по этим данным абсолютных измерений оказывается теснее, чем связь СА с САЗ (при антикорреляции). Величина коэффициента корреляции по отдельной станции $TSMB$ центральной зоны $\rho_{1976-2019}(N_{EQ/Year}, I_{TSMB})_{p < 0.05} \cong 0.4613$ оказывается еще более высокой, и, одновременно с этим (это также хорошо видно из рис. 3), $\rho_{1976-2019}(I_{GCR}, I_{TSMB})_{p < 0.05} \cong 0.9743$, т.е. интенсивности ГКЛ, несмотря на их значительное различие (в абсолют-

ных единицах в разных точках Земли), хорошо коррелируют.

Сопоставим теперь относительную вариацию δ_{Year} на фиксированной жесткости 10 ГВ вне атмосферы и магнитосферы Земли на расстоянии 1 а. е., полученную методом глобальной съемки с разрешением в 1 год за период с 1973 по 2019 г., с временным поведением $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$ на этом же временном промежутке (как это уже было сделано в работе [Хегай и др., 2022], в которой, однако, не был учтен последний 2019 г. 24-го цикла СА). Такое сравнение приведено на рис. 4, который повторяет рис. 3 с той лишь разницей, что вместо величин I_{GCR} и I_{TSMB} на верхней панели приведена величина δ_{Year} (%). В интервале 2007–2011 г. так-

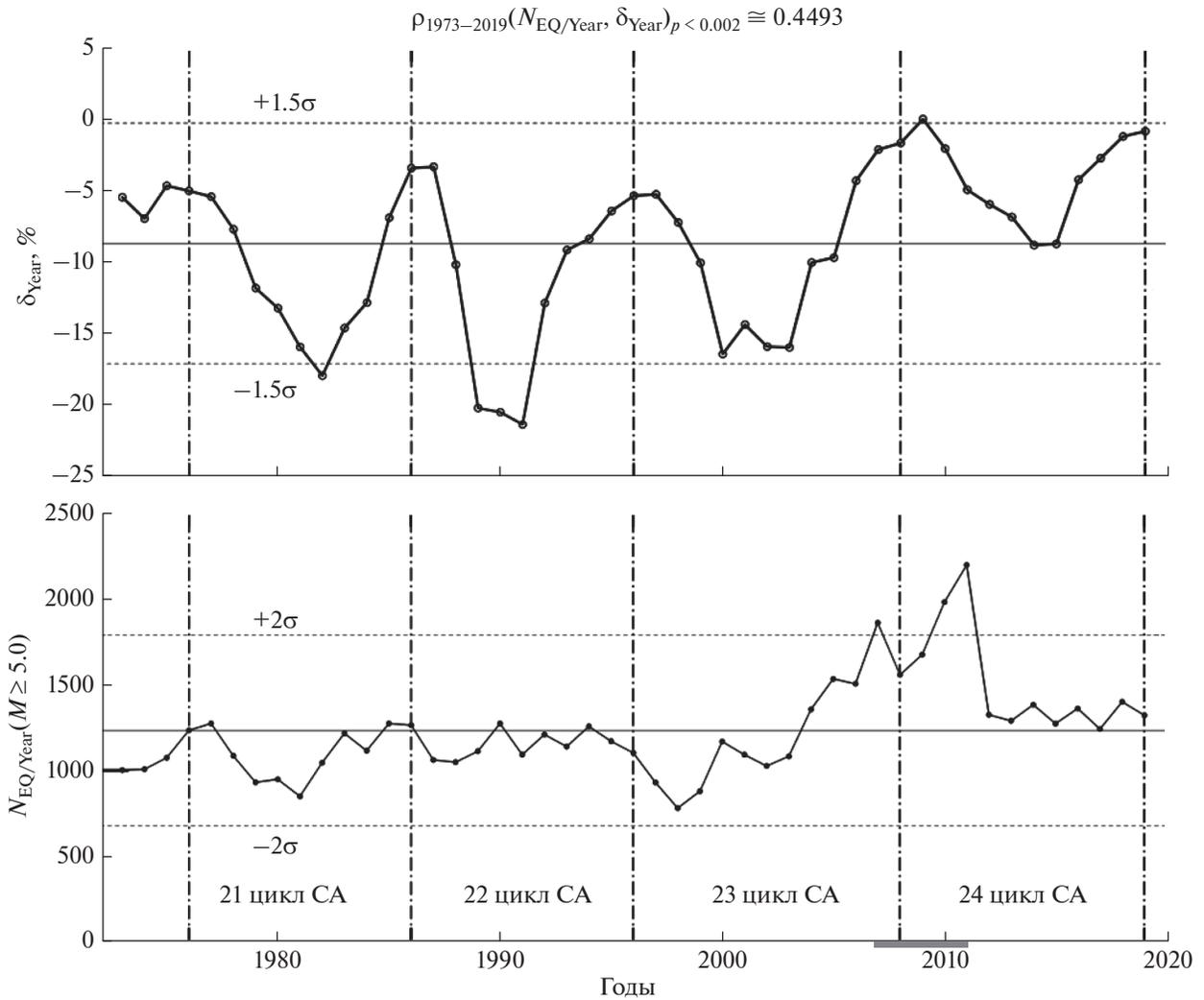


Рис. 4. То же, что и рис. 3, но вместо величин I_{GCR} и I_{TSMB} на верхней панели приведена величина δ_{Year} (%).

же наблюдается превышение верхней границы уровня $\langle \delta_{Year} \rangle + 1.5\sigma$, которое совпадает с превышением на этом же временном интервале уровня $\langle N_{EQ/Year}(M \geq 5.0) \rangle_{1973-2019} + 2\sigma$ в поведении $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$.

Получается, что $\rho_{1973-2019}(N_{EQ/Year}, \delta_{Year})_p < 0.002 \cong 0.4493$, тогда $abs\{\rho_{1973-2019}(N_{EQ/Year}, \delta_{Year})_p < 0.002\} - abs\{\rho_{1973-2019}(N_{EQ/Year}, F_{10.7Year})_p < 0.004\} = 0.4493 - 0.4139 = 0.0354$. К чему приводит такое небольшое различие в абсолютных величинах соответствующих коэффициентов корреляции, показывает рассмотрение, проведенное ниже.

Для разделения эффектов влияния на САЗ (т.е. на вариации $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$) двух различных факторов: СА (т.е. величины годового потока солнечного излучения на длине волны 10.7 см, взятого как сумма соответствующих среднемесячных потоков – $F_{10.7Year}$) и вариаций интенсивности ГКЛ (δ_{Year}) можно использовать метод

частной корреляции, позволяющий оценить взаимосвязь между двумя переменными, при исключении влияния других переменных (см., напр., [Брукс и Карузертс, 1963]). Так, в случае трех переменных, коэффициент частной корреляции ρ_{12-3} между переменными x_1 и x_2 при исключении влияния третьей переменной x_3 может быть записан как $\rho_{12-3} = (\rho_{12} - \rho_{13}\rho_{23}) / [(1 - \rho_{13}^2)(1 - \rho_{23}^2)]^{1/2}$, где ρ_{ij} – коэффициенты корреляции между переменными x_i и x_j . Коэффициент частной корреляции показывает тесноту взаимосвязи двух переменных относительно друг друга, без учета влияния третьей переменной. Вычисленные таким образом коэффициенты частной корреляции оказываются следующими:

$$\rho(\delta_{Year} \rightarrow N_{EQ/Year}) \cong \rho_{1973-2019}(N_{EQ/Year}, \delta_{Year})_{-F_{10.7Year}} \cong 0.1979 \quad (\text{исключено влияние } F_{10.7Year})$$

Таблица 1. Параметры станций нейтронных мониторов из NMDB, данные которых использовались в работе

| Название станции | h , м | R , ГВ | φ , град | λ , град |
|------------------|---------|----------|------------------|------------------|
| Thule (THUL) | 26 | 0.3 | 76.5 N | 68.7 W |
| Oulu (OULU) | 15 | 0.81 | 65.05 N | 25.47 E |
| Kerguelen (KERG) | 33 | 1.14 | 49.35 S | 70.25 E |
| Newark (NEWK) | 50 | 2.4 | 39.68 N | 75.75 W |
| Hermanus (HRMS) | 26 | 4.58 | 34.43 S | 19.23 E |
| Tsumeb (TSMB) | 1240 | 9.15 | 19.2 S | 17.58 E |

Примечание. h – высота над уровнем моря; R – жесткость; φ – географическая широта; λ – географическая долгота.

$$\rho(F10.7_{\text{Year}} \rightarrow N_{\text{EQ/Year}}) \equiv \rho_{1973-2019}(N_{\text{EQ/Year}}, F10.7_{\text{Year}})_{-\delta_{\text{Year}}} \cong -0.0488 \text{ (исключено влияние } \delta_{\text{Year}})$$

откуда следует, что $\text{abs}\{\rho(\delta_{\text{Year}})/\rho(F10.7_{\text{Year}})\} \cong 4.057$. Таким образом, получается, что влияние вариаций интенсивности ГКЛ (вне атмосферы и магнитосферы Земли на расстоянии 1 а. е.) на поведение $N_{\text{EQ/Year}}$ оказывается гораздо более существенным, чем воздействие на $N_{\text{EQ/Year}}$ собственно вариаций СА, которые отражаются в изменениях величины $F10.7_{\text{Year}}$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные выше результаты, основанные на количественных оценках, прежде всего свидетельствуют в пользу того, что уровень относительной интенсивности первичных потоков ГКЛ (δ_{Year}), измеренной вне атмосферы и магнитосферы Земли на расстоянии 1 а. е. (как независимая величина) в большей степени влияет на изменение уровня САЗ ($N_{\text{EQ/Year}}(M \geq 5.0)$), чем вариации собственно СА (мерой которой служит $F10.7_{\text{Year}}$). Такое более сильное влияние ГКЛ на САЗ может определяться ролью ГКЛ в формировании облачности и процессов тропического и внетропического циклоногенеза, определяющих мощь и количество основных барических структур атмосферы, которые могут стать триггерами “созревших” очагов землетрясений [Сытинский, 1989; Барляева и др., 2000; Carslaw et al., 2002; Боков и Сытинский, 2002; Боков, 2011; Боков и др., 2011; Боков и Воробьев, 2014; Боков и Воробьев, 2016; Соболев и Закржевская, 2020; Хегай и др., 2022] на траекториях своих движений. Так как квадрат коэффициента корреляции называется коэффициентом детерминации, и он показывает долю вариации результативного признака, объясненную вариацией факторного признака, то $\{\rho_{1973-2019}(N_{\text{EQ/Year}}, \delta_{\text{Year}})_p < 0.002\}^2 \cong 0.4493^2 \approx 0.2$, и в исследуемой ситуации примерно только 20% общей вариальности $N_{\text{EQ/Year}}(M \geq 5.0)$, характеризующей САЗ, может быть объяснено изменениями δ_{Year} в рамках линейной однофакторной модели. Следовательно, интенсивность вариаций САЗ

определяется далеко не единственным, но существенным фактором δ_{Year} , характеризующим вариации интенсивности ГКЛ.

В современных исследованиях инициация коровых землетрясений тропическими циклонами уже была рассмотрена на ряде конкретных примеров в работе [Костин и др., 2020]. Авторы этой работы показали, что при прохождении тропическим циклоном пограничных областей больших литосферных плит могут произойти безфоршоковые землетрясения магнитудой $M > 4.6$ на границах малых литосферных плит глубиной около 30 км. Физический механизм этого явления связан с литосферной передачей дополнительного момента сил из области разрежения над тропическим циклоном. Так, синхронное резкое падение давления над литосферными плитами, вызванное ураганами в восточной части и тайфунами в западной части Тихого океана, привело к изменению момента сил, воздействующих на малые литосферные плиты: Бирманскую, Сандвическую, Панамскую. В результате 24–26 июня 1992 г. на их границах произошли безфоршоковые литосферные землетрясения с магнитудой $M \sim 4.6-5.9$ на глубине ~ 30 км. Этот механизм обсуждался ранее в работе [Kostin et al., 2019]. Развитие исследований в этом направлении в работе [Костин и др., 2021] обнаруживает, что возникновение и развитие мощных источников воздействия на атмосферу – тропических циклонов и сильных литосферных землетрясений взаимосвязаны. Эта взаимосвязь проявляется следующим образом: в области разрежения тропических циклонов литосферные плиты резко приподнимаются, а на краях опускаются. Вследствие этого происходит сброс напряжений внутри твердой Земли, т.е. тропический циклон является триггером землетрясения. В свою очередь, акустическое воздействие сильных землетрясений на области барических тропических возмущений или ослабленный тропический циклон может интенсифицировать их.

Как показывает проведенное нами исследование, именно землетрясения центральной зоны (см. рис. 2) – в тропиках и субтропиках – составляют основной массив всех землетрясений

$N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$ в 21–24-м циклах СА, что согласуется с концепцией, представленной в работе [Костин и др., 2021].

5. ВЫВОДЫ

1. Показано, что глобально, в интервале с 2007 по 2011 г., число сильных (магнитуда $M \geq 5.0$) коровых (глубина гипоцентра $0 \leq h \leq 60$ км) землетрясений в году $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$, принятое как мера интенсивности сейсмической активности Земли, значительно превосходит верхнюю границу уровня в два стандартных отклонения, и максимальное относительное отклонение (в 2011 г.) от среднего, рассчитанного с 1973 по 2019 г. (21–24-й циклы СА), составляет $\approx 78\%$. Такая ситуация наблюдается в конце 23 и начале 24-го циклов СА. Указанный временной промежуток характеризуется максимальной интенсивностью ГКЛ на расстоянии 1 а. е. вне магнитосферы Земли на фиксированной жесткости 10 ГВ за весь период наблюдений (с пятидесятих годов прошлого столетия по настоящее время), а величина относительной интенсивности ГКЛ (δ_{Year}) превосходит в 2009 г. полтора стандартных отклонения от своей средней величины, вычисленной на интервале с 21-го по 24-й цикл СА.

2. В среднем, за период с 1973 по 2019 г., суммарное количество землетрясений $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$ северной (North) и южной (South) зон составляет 65% от их количества, произошедших в центральной (Center) зоне, ограниченной географическими параллелями на широтах $\varphi = \pm 30^\circ$. Исключение составляет лишь 2011 г., когда это отношение равно $\cong 1.36$ и суммарное число землетрясений северной и южной зон превосходит число землетрясений, случившихся в центральной зоне. В 2010 г. наблюдается существенное преобладание числа землетрясений в южной зоне над их числом в северной (обычно – наоборот). Отмеченные особенности наблюдаются в начале 24-го цикла СА и в пределах того же интервала, когда поток ГКЛ на расстоянии 1 а. е. вне магнитосферы Земли на фиксированной жесткости 10 ГВ особенно интенсивен (на этом же временном промежутке существенно увеличивается и количество землетрясений центральной зоны).

3. Все проведенные в работе количественные оценки свидетельствуют в пользу того, что уровень относительной интенсивности первичных ГКЛ (δ_{Year}), измеренной вне атмосферы и магнитосферы Земли на расстоянии 1 а. е. (как независимая величина) в большей степени влияет на изменение уровня САЗ ($N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$), чем вариации собственно СА (мерой которой служит $F_{10.7Year}$). Такое более сильное влияние ГКЛ на САЗ может определяться важнейшей ролью этих частиц в формировании глобальной облачности и

процессов тропического и внетропического циклоногенеза, определяющих мощь и количество основных барических структур атмосферы, которые могут стать триггерами “созревших” очагов землетрясений на траекториях своих движений. Однако, в исследуемой ситуации примерно только 20% общей варибельности $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$, характеризующей САЗ, может быть объяснено изменениями δ_{Year} в рамках линейной однофакторной модели.

4. Описанный в работе сценарий связи между ГКЛ и САЗ опирается на ряд других исследований (см. работу [Хегай и др., 2022] и ссылки в ней), не противоречит проанализированным комплексным экспериментальным данным и частично объясняет наблюдаемые вариации САЗ.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI), USA и Space Weather Prediction Center National Oceanic and Atmospheric Administration, USA, геофизические данные которых были использованы в данной работе, а также United States Geological Survey's (USGS) Earthquake Hazards Program за предоставление доступа к данным по землетрясениям. Авторы также благодарны коллективам мировой сети станций космических лучей, обеспечивающим данные непрерывной регистрации нейтронной компоненты: (http://cr0.izmiran.ru/ThankYou/Our_Acknowledgment.pdf), кроме этого, мы благодарим базу данных NMDB (www.nmdb.eu), созданную в рамках программы FP7 Европейского Союза (контракт № 213007), за возможность использования большого объема данных мировой сети нейтронных мониторов. Работа базируется также на экспериментальных данных УНУ № 85 “Российская национальная сеть станций космических лучей”.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда РФНФ, грант № 20-72-10023 (Абуниин А.А., Абунина М.А., Белов А.В. – Выводы № 2 и 3) и Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ, грант № 18-52-34004 (Абуниин А.А. – Вывод № 1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барляева Т.В., Морозова А.Л., Пудовкин М.И. Влияние космических факторов на развитие землетрясений / Геофизические методы исследования Земли и недр. Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов “Геофизика-99” (Санкт-Петербург, 9–12 ноября 1999 г.). Ред. В.Н. Страхов, В.П. Кальварская, М. С. 8–19. 2000.
- Белов С.В., Шестопалов И.П., Харин Е.П. О взаимосвязях эндогенной активности земли с солнечной и

- геомагнитной активностью // ДАН. Геофизика. Т. 428. № 1. С. 104–108. 2009.
- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.Г. и др. Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 58. № 3. С. 374–389. 2018.
<https://doi.org/10.7868/S0016794018030082>
- Белов А.В., Гущина Р.Т., Шлык Н.С., Янке В.Г. Сравнение долговременных изменений потока космических лучей по данным сети наземных детекторов, PAMELA И AMS-021 // Известия РАН. Серия физическая. Т. 85. № 9. С. 1347–1350. 2021.
<https://doi.org/10.31857/S0367676521090040>
- Боков В.Н., Сытинский А.Д. Оперативный краткосрочный прогноз землетрясений на основе сейсмо-синоптического метода (результаты годового испытания) / Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций и их источников. Научно-практическая конференция. 26–27 июня 2001 г. МЧС России, Центр “Антистихия”, М. С. 34–39. 2002.
- Боков В.Н. Когда содрогнется Земля? Краткосрочные прогнозы землетрясений // Наука и жизнь. № 9. С. 47–57. 2011.
- Боков В.Н., Гутишабаш Е.Ш., Потиха Л.З. Атмосферные процессы как триггерный эффект возникновения землетрясений // Учен. зап. РГГМУ. № 18. С. 173–184. 2011.
- Боков В.Н., Воробьев В.Н. Мониторинг геофизических предвестников и прогноз землетрясений // Учен. зап. РГГМУ. № 36. С. 128–138. 2014.
- Боков В.Н., Воробьев В.Н. Прогнозы сейсмических событий с использованием геофизических и атмосферных предвестников // Учен. зап. РГГМУ. № 44. С. 141–148. 2016.
- Брукс К., Карузерс Н. Применение статистических методов в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 416 с. 1963.
- Дорман Л.И. Метеорологические эффекты космических лучей. М.: Наука, 210 с. 1972.
- Ишков В.Н. Периоды “пониженной” и “повышенной” солнечной активности: наблюдательные особенности и ключевые факты / Солнечная и солнечно-земная физика-2013. Ред. Ю.А. Наговицын. Санкт-Петербург: Изд.-во ВВМ, С. 111–114. 2013.
- Ким Г.А., Покровская И.В., Шарков Е.А. Глобальный тропический циклогенез: широтное распределение энергозапаса по данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 3. № 1. С. 287–295. 2006.
- Костин В.М., Беляев Г.Г., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П. Взаимосвязь развития тропических циклонов и отдельных сильных землетрясений в июне 1992 по данным мониторинга плазмы ионосферы со спутника Космос-1809 // Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. Москва: ИКИ РАН, 2020. С. 401.
<https://doi.org/10.21046/18DZZconf-2020a>
- Костин В.М., Беляев Г.Г., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П. Мониторинг параметров плазмы верхней ионосферы для выявления мощных естественных и техногенных источников воздействия на атмосферу из опыта работы спутника Космос-1809 // Материалы 19-й Международной конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 412.
<https://doi.org/10.21046/19DZZconf-2021a>
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А. Локальные тектонические деформации и близкие по месту и времени землетрясения // Вулканология и сейсмология. № 3. С. 3–11. 2020.
<https://doi.org/10.31857/S0203030620030074>
- Сытинский А.Д. О связи землетрясений с солнечной активностью // Физика Земли. № 2. С. 13–30. 1989.
- Сытинский А.Д., Боков В.Н., Оборин Д.А. Зависимость циркуляции атмосферы Земли от процессов на Солнце и в межпланетной среде // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 43. № 1. С. 136–142. 2003.
- Хегай В.В. О корреляции между сильными землетрясениями и уровнем солнечной активности в 21, 22 и 23 циклах // Астрономия-2018. Т. 2. Солнечно-земная физика – современное состояние и перспективы. Ред. В.Н. Обридко. М.: Тривант. С. 262–265. 2018.
<https://doi.org/10.31361/eaas.2018-2.066>
- Хегай В.В., Легенька А.Д., Абуниин А.А., Абунина М.А., Белов А.В., Гайдаш С.П. Солнечная активность, вариации галактических космических лучей и глобальная сейсмичность Земли // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 62. № 1. С. 40–51. 2022.
<https://doi.org/10.31857/S0016794022010102>
- Шестопалов И.П., Харин Е.П. О связи сейсмичности Земли с солнечной и геомагнитной активностью / Сб. докл. Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений. III Междунар. конф. с. Паратунка Камч. обл. 16–21 августа 2004. Петропавловск-Камч.: ИКИР ДВО РАН. С. 130–141. 2004.
- Belov A., Eroshenko E., Yanke V. et al. The Global Survey Method applied to ground-level cosmic ray measurements // Solar Physics. V. 293. I. 4. AN 68. 2018.
<https://doi.org/10.1007/s11207-018-1277-6>
- Carslaw K.S., Harrison R.G., Kirkby J. Cosmic rays, clouds, and climate // Science. V. 298. P. 1732–1737. 2002.
<https://doi.org/10.1126/science.1076964>
- http://cr0.izmiran.ru/ThankYou/Our_Acknowledgment.pdf
- <http://isccp.giss.nasa.gov/>
- https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/noontime-flux/penticton/penticton_averaged/
- <https://www.nmdb.eu/nest/>
- <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>
- <https://www.usgs.gov/>

- *Kostin V., Belyaev B., Ovcharenko O., Trushkina E.* Features of some interacting tropical cyclones in the Indian Ocean after the Mount Pinatubo eruption // *International Journal of Engineering Research & Science*. 2019. V. 5(9). P. 19–26.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.3465257>
- *Marsh N.D., Svensmark H.* Low cloud properties influenced by cosmic rays // *Phys. Rev. Lett.* V. 85. Iss. 23. P. 5004–5007. 2000.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.5004>
- *Mironova I.A., Aplin K.L., Arnold F., Bazilevskaya G.A., Harrison R.G., Krivolutsky A.A., Nicoll K.A., Rozanov E.V., Turunen E., Usoskin I.G.* Energetic Particle Influence on the Earth’s Atmosphere // *Space Sci. Rev.* V. 194. P. 1–96. 2015.
<https://doi.org/10.1007/s11214-015-0185-4>
- *Svensmark H., Friis-Christensen E.* Variations of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 59. Iss. 11. P. 1225–1232. 1997.
[https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(97\)00001-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(97)00001-1)
- *Yasue S., Mori S., Sakakibara S., Nagashima K.* Coupling coefficients of cosmic ray daily variations for neutron monitor stations. Nagoya, 225 p. № 7. 1982.