

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ, ВАРИАЦИИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И ГЛОБАЛЬНАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗЕМЛИ

© 2022 г. В. В. Хегай¹, А. Д. Легенька¹, А. А. Абуни¹*, М. А. Абунина¹, **, А. В. Белов¹, С. П. Гайдаш¹

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 09.12.2020 г.

После доработки 01.06.2021 г.

Принята к публикации 24.09.2021 г.

Выполнен сопоставительный корреляционный анализ с 21 по 24 цикл солнечной активности между числом сильных (магнитуда $M \geq 5.0$) коровых (глубина гипоцентра $0 \leq h \leq 60$ км) землетрясений в году ($N_{EQ/Year}$), отражающим глобальную сейсмическую активность Земли, и суммарным годовым потоком солнечного излучения на длине волны 10.7 см ($F10.7_{Year}$), интегрально характеризующим уровень солнечной активности. Статистически значимый коэффициент линейной корреляции $\rho(N_{EQ/Year}, F10.7_{Year}) = -0.414$. Рассмотрена корреляция между $N_{EQ/Year}$ и среднегодовой вариацией интенсивности потоков галактических космических лучей δ_{Year} на этом же временном интервале, при этом $\rho(N_{EQ/Year}, \delta_{Year}) = 0.459$, что позволяет объяснить ~20% изменений $N_{EQ/Year}$ в рамках линейной однофакторной модели изменениями δ_{Year} , и при рассмотрении солнечной активности и интенсивности галактических космических лучей как независимых факторов, формирующих сейсмическую активность Земли, теснота связи между интенсивностью галактических космических лучей и сейсмической активностью Земли оказывается больше, чем между солнечной активностью и сейсмической активностью Земли на изученном интервале времени для массива сильных землетрясений с $M \geq 5.0$. Такая умеренная корреляция может быть обусловлена соответствующим перераспределением давления на уровне тропосферы, связанным с увеличением облачности при росте интенсивности потоков галактических космических лучей в периоды низкой солнечной активности, непосредственно ионизирующих нижние слои атмосферы и опосредовано влияющих на динамические процессы в них. При этом происходят такие изменения режима глобальной циркуляции в тропосфере, которые способствуют активации “созревших” очагов сильных землетрясений основными барическими структурами атмосферы – циклонами и антициклонами.

DOI: 10.31857/S0016794022010102

1. ВВЕДЕНИЕ

Связь сейсмической активности Земли (САЗ) с уровнем солнечной активности (СА) уже давно является предметом научных исследований и обсуждений [Сытинский, 1963]. В цикле работ А.Д. Сытинского, выполненных на интервале с 1963 по 1989 г. ([Сытинский, 1989] и ссылки там), был достоверно установлен сам факт влияния СА на САЗ и приведены важные количественные эмпирические соотношения между уровнем СА и интенсивностью САЗ. Более того, в одной из последних ключевых работ этого цикла [Сытинский, 1989] было указано, что, исходя из анализа всех имеющихся у автора данных, можно сделать вывод о том, что влияние СА на землетрясения осуществляется через *атмосферные процессы*. Особо было отмечено, что в среднем, сильные

землетрясения опережают сильные магнитные возмущения на один день, что указывает на различие механизмов передачи энергии солнечного ветра магнитосфере и атмосфере Земли. Позднее, на основании проведенного в работе [Барляева и др., 2000] исследования ряда интенсивных ($M \geq 7.0$) землетрясений с 1962 по 1995 гг., предложенная Сытинским схема вероятного воздействия СА на развитие интенсивных землетрясений, была следующим образом детализирована: изменение солнечной активности влечет за собой изменение межпланетного магнитного поля (ММП) вблизи Земли, которое влияет на интенсивность ($I_{ГКЛ}$) галактических космических лучей (ГКЛ). Изменение $I_{ГКЛ}$ вызывает атмосферные перестройки, вследствие которых нарушается баланс давлений на стыке блоков; если накоплен-

ные 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 [Reid, 1910], происходит землетрясение. В статье [Барляева и др., 2000] эта схема упрощенно выглядит следующим образом:

Вариации магнитного поля Солнца ⇒ Вариации магнитного поля гелиосферы ⇒ Вариации ГКЛ в земной атмосфере ⇒ Вариации распределения атмосферного давления ⇒ Землетрясение.

При этом, в качестве меры интенсивности СА так же, как и в работах Сытинского, были выбраны числа Вольфа (например, [Сытинский, 1989]). В эту схему, как видно из рис. 13 в работе [Барляева и др., 2000], включены также и солнечные космические лучи (СКЛ), которые в тексте работы обсуждаются очень кратко, однако указано, что, по сути, интенсивность СКЛ ($I_{СКЛ}$) большая в периоды высокой СА и маленькая во время низкой СА отображается (косвенно) числами Вольфа (W), а интенсивность ГКЛ практически антикоррелирует с ними: коэффициент корреляции на исследуемом временном интервале для сглаженного по пяти годам в одиннадцатилетнем цикле ряда $I_{ГКЛ}$ с W , $\rho(I_{ГКЛ}, W) = -0.81$. Это означает, что, когда высока интенсивность ГКЛ, мала интенсивность СКЛ, и наоборот.

В работе [Боков и Сытинский, 2002] на основе изучения вариаций барических распределений, связанных с СА, как основных агентов, “провоцирующих” сильные землетрясения, были представлены результаты испытания разработанного сейсмо-синоптического метода для краткосрочного (2–4 сут до толчка) прогнозирования землетрясений. Анализ качества прогнозов землетрясений показал, что по времени (интервал: 1 день + 23 ч) их оправдываемость составила 69.3%, а для отдельных регионов (Турция; США (Калифорния) и ряда других) около 80%. Было достигнуто также неплохое качество прогнозирования места эпицентра землетрясений. Более того, авторы далее делают вывод, что барические перестройки, обусловленные физическими законами и связями в системе “Солнце–атмосфера Земли–твердая Земля”, инициируют поверхностные землетрясения с магнитудой $M > 5$ в 90–95% случаев. Дальнейшее развитие этого сейсмо-синоптического метода краткосрочного прогнозирования землетрясений представлено в работах [Боков, 2011; Боков и др., 2011; Боков и Воробьев, 2014; 2016]. В рамках настоящей работы наиболее важным элементом оказывается следующий тезис, сформулированный в работе [Боков и др., 2011]: “Быстрые смещения крупных воздушных масс увеличивают или снимают нагрузки на земную кору и приводят к ее деформации. Образовавши-

еся 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 (рис. 8 в [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. Методология расчета барических нагрузок на земную поверхность, которые необходимо определить для выявления атмосферно-циркуляционных предвестников (АЦП) землетрясений на основании актуальных карт распределения давления в заданном регионе, приведена в работе [Боков и Воробьев, 2014].

В работе [Сытинский и др., 2003], посвященной исследованию геоэффективности параметров солнечного ветра при изучении солнечно-атмосферных связей, прямо сказано, что атмосферная циркуляция в значительной мере контролируется процессами на Солнце и в межпланетной среде. При этом в качестве одного из основных выводов указывается, что энергия солнечно-атмосферных возмущений соответствует энергии циклонов и, следовательно, влияет на погоду. Поэтому в физических и прогностических моделях атмосферы, а также при разработке методов прогноза времени и места возникновения сильных землетрясений необходимо учитывать СА и состояние межпланетной среды.

ГКЛ являются постоянно присутствующей компонентой межпланетной среды, пронизывающей всю толщу земной атмосферы, их роль в образовании облачности непосредственно [Pudovkin and Veretenenko, 1995] и в формировании барических перестроек в тропосфере опосредовано [Веретененко и Огурцов, 2015a] весьма значима, так как облачные массивы различного масштаба являются неотъемлемыми элементами фундаментальных барических структур атмосферы (циклонов, антициклонов, ложбин), определяющих атмосферную циркуляцию. Естественным образом возникает вопрос о соотношении интенсивности ГКЛ и количеством сильных землетрясений. Частично ответ на этот вопрос для временного интервала с 1962 по 1995 гг. (чуть более чем три одиннадцатилетних цикла СА) и зем-

летрясений с $M \geq 7.0$ был получен в работе [Барляева и др., 2000]. Оказалось, что для всей Земли в целом коэффициент корреляции $\rho(N_{EQ/Year}, I_{ГКЛ}) = 0.35$ (таблица на стр. 18 в работе [Барляева и др., 2000]).

В первой части настоящего исследования проводится сопоставительный (корреляционный) анализ между числом сильных (магнитуда $M \geq 5.0$) коровых (глубина гипоцентра $0 \leq h \leq 60$ км) землетрясений в году ($N_{EQ/Year}$) и годовым уровнем СА (годовой поток солнечного излучения на длине волны 10.7 см, взятый как сумма соответствующих среднемесячных потоков – $F10.7_{Year}$) на временном интервале, охватывающем с 21 по 24 цикл (четыре одиннадцатилетних) солнечной активности (с 1973 по 2018 гг.). Такой выбор корреляционной пары обусловлен, во-первых, достаточно высокой надежностью каталога Национального Центра информации о землетрясениях Геологической службы США (NEIC, USGS, (<https://www.usgs.gov/>)) с 1973 г., во-вторых, тем, что параметр $F10.7$, хорошо коррелирующий с числами Вольфа, сам по себе является интегральным энергетическим (в отличие от чисел Вольфа) параметром, характеризующим СА в целом.

Во второй части работы проводится такое же сопоставление с интенсивностью годового потока ГКЛ, который сначала оценивается через суммарное количество Форбуш-понижений в году ($FDS_{Year\Sigma}$), а затем – через относительную, усредненную за год по среднемесячным данным, величину – через среднегодовую вариацию интенсивности потоков галактических космических лучей (δ_{Year} , %), характеризующую интенсивность изотропной составляющей потока ГКЛ:

$$\delta_{Year} = 100 \times [\langle A_0 \rangle_{Year} - \langle A_0 \rangle_{2008}] / \langle A_0 \rangle_{2008}, \quad (1)$$

где A_0 – вариация интенсивности ГКЛ на фиксированной жесткости 10 ГВ вне атмосферы и магнитосферы Земли, полученная методом глобальной съемки по данным всей мировой сети нейтронных мониторов [Белов и др., 2018; Belov et al., 2018]. В качестве базового периода для нормировки выбран 2008 год, когда наблюдалась минимальная СА по величине годового потока солнечного излучения на длине волны 10.7 см в течение изучаемых в данной работе циклов. С математической точки зрения, величина A_0 есть амплитуда нулевой гармоники вариации интенсивности ГКЛ (стр. 4, уравнение 7 в работе [Белов и др., 2018]), полученная в результате разложения этой интенсивности по сферическим гармоникам (напр., [Yasue et al., 1982]).

2. СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ С 21-го ПО 24-й ЦИКЛ И ГЛОБАЛЬНАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗЕМЛИ

В работе [Шестопапов и Харин, 2004] исследовалась взаимосвязь между СА и САЗ за период 1900–2002 гг. В основе этих исследований лежало представление о сейсмичности как о части единого физического процесса в системе “Солнце–Земля”. При таком подходе сейсмические явления определяются процессами как солнечного, так и земного происхождения. В работе было показано, что существуют 11-летние циклы сейсмической активности на Земле, которые имеют существенную отрицательную корреляцию с циклами солнечной активности (с циклами солнечных пятен), а на протяжении 11-летнего солнечного цикла САЗ возрастает в периоды минимальной СА и во время крупных солнечных вспышек. В качестве меры уровня СА в этой работе рассматривались годовые числа Вольфа (W), а САЗ оценивалась по величине годового энерговыделения сейсмической энергии (E) в сильных землетрясениях. Оказалось также, что минимальная наблюдаемая абсолютная величина коэффициента корреляции в этой паре (отрицательного) $|\rho(E, W)|$ равна 0.54, что по шкале Чеддока, характеризующей тесноту связи, определяется как “заметная” ($0.5 < |\rho| < 0.7$).

Далее, в работе [Хегай, 2018], для более короткого временного интервала, охватывающего 21–23 циклы солнечной активности, было получено, что в соответствии со статистикой Стьюдента с уровнем значимости $\alpha = 0.05$, получается статистически значимая величина коэффициента корреляции $\rho(N_{EQ/Year}, F10.7_{Year}) = -0.392$, если $N_{EQ/Year}$ – число сильных (магнитуда $M \geq 6.0$) коровых землетрясений в году. Таким образом, теснота связи между $N_{EQ/Year}$ и $F10.7_{Year}$ на этом временном отрезке определяется как “умеренная” ($0.3 < |\rho| < 0.5$) и оказывается в диапазоне на ранг ниже, чем наименьшая из абсолютных величин ρ , приводимых в статье [Шестопапов и Харин, 2004]. Тем не менее, этот результат в целом согласуется с выводами, полученными в работе [Шестопапов и Харин, 2004] о наличии устойчивой антикорреляции между СА и САЗ в циклах на более длинном временном интервале.

Прежде чем продолжить корреляционный анализ связи САЗ и СА на выбранном нами временном интервале, необходимо сделать дополнительное разъяснение относительно характеристик землетрясений, входящих в это рассмотрение. Граница между сильными и слабыми землетрясениями по величине магнитуды (M) может быть проведена различным образом. Так, в монографии [Шебалин, 1997] к сильным отнесены уже такие землетрясения, для которых $M \geq 4.0$. Однако, так как землетрясений, для которых

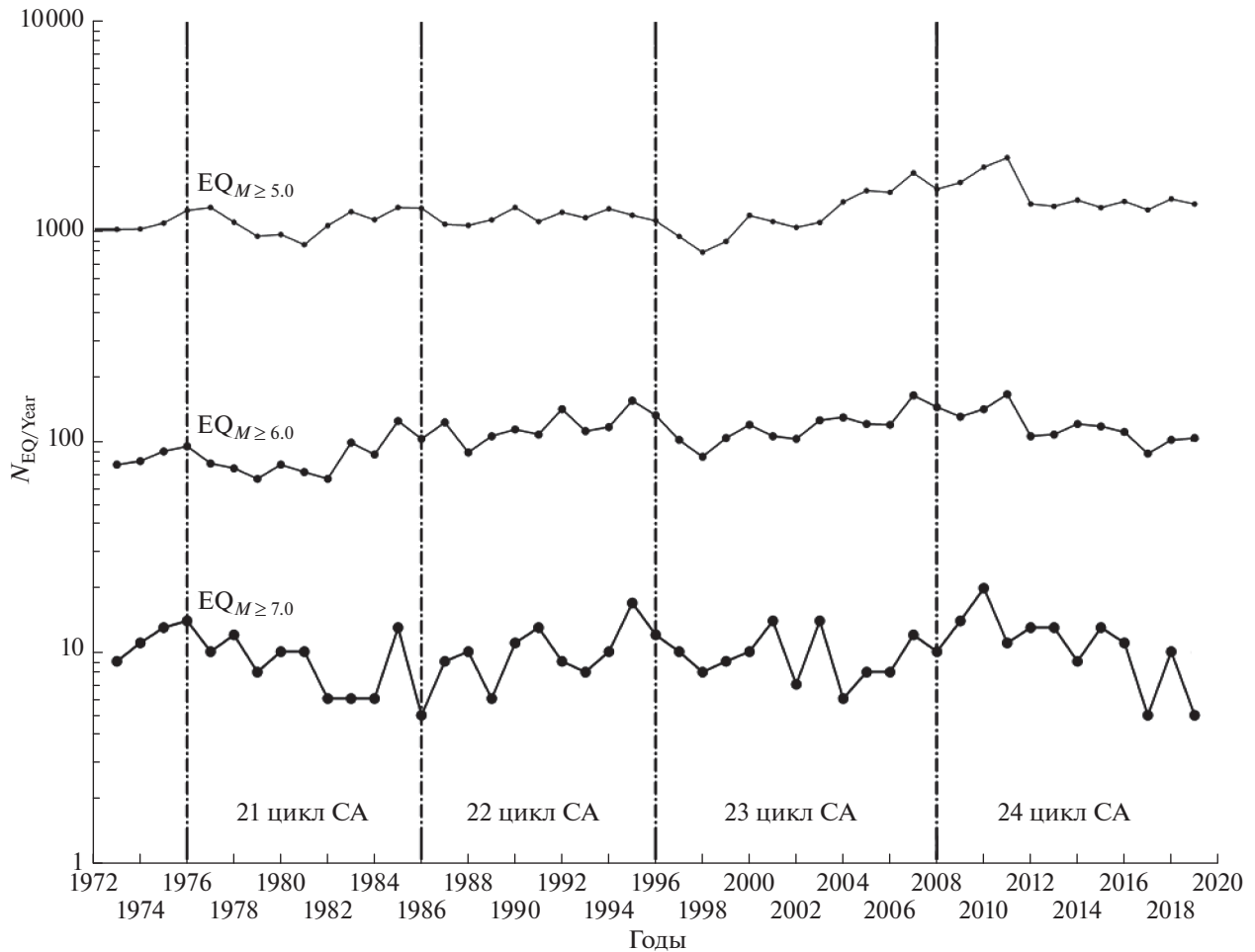


Рис. 1. Распределение количества землетрясений по годам $N_{EQ/Year}$, в зависимости от величины магнитуды M . Верхняя кривая отображает число землетрясений в году с $M \geq 5.0$ ($EQ_{M \geq 5.0}$), средняя – с $M \geq 6.0$ ($EQ_{M \geq 6.0}$), а нижняя – с $M \geq 7.0$ ($EQ_{M \geq 7.0}$). Границы циклов СА (вертикальные штрихпунктирные линии) взяты в соответствии с работой [Ишков, 2013].

$4.0 < M < 5.0$ происходит, по различным оценкам [Апродов, 2000], от 5000 до 15000 в год, то не все они могут быть надежно зафиксированы в каталогах. В нашем дальнейшем анализе будут учтены только землетрясения, для которых $M \geq 5.0$, занесенные в каталог NEIC, USGS с 1973 г. Именно число таких землетрясений в году будет количественной мерой глобальной САЗ в нашем исследовании, как это уже было указано во Введении.

На рисунке 1 приведена картина распределения числа землетрясений по годам $N_{EQ/Year}$, в зависимости от величины магнитуды. Верхняя кривая отображает число землетрясений в году с $M \geq 5.0$ ($EQ_{M \geq 5.0}$), средняя – с $M \geq 6.0$ ($EQ_{M \geq 6.0}$), а нижняя – с $M \geq 7.0$ ($EQ_{M \geq 7.0}$). Хорошо видно, что с увеличением магнитуды на единицу число землетрясений в году уменьшается примерно на порядок величины. Точные границы оказываются следующими: $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0) \in [782; 2196]$; $N_{EQ/Year}(M \geq 6.0) \in [66; 166]$; $N_{EQ/Year}(M \geq 7.0) \in [5; 20]$.

Рисунок 2 показывает поведение $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$ (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. Для этой пары параметров статистически значимый (с уровнем значимости $\alpha = 0.05$ в соответствии со статистикой Стьюдента) коэффициент линейной корреляции $\rho(N_{EQ/Year}, F10.7_{Year}) = -0.414$, т. е. наблюдается антикорреляция с “умеренной” теснотой связи между $N_{EQ/Year}$ и $F10.7_{Year}$ на этом временном отрезке. Данные по величине среднего за месяц потока $F10.7$ (в *sfu* – solar flux units) с января 1973 г. 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 г. по декабрь 2019 г. – с электронного адреса (<https://www.swpc.noaa.gov/>

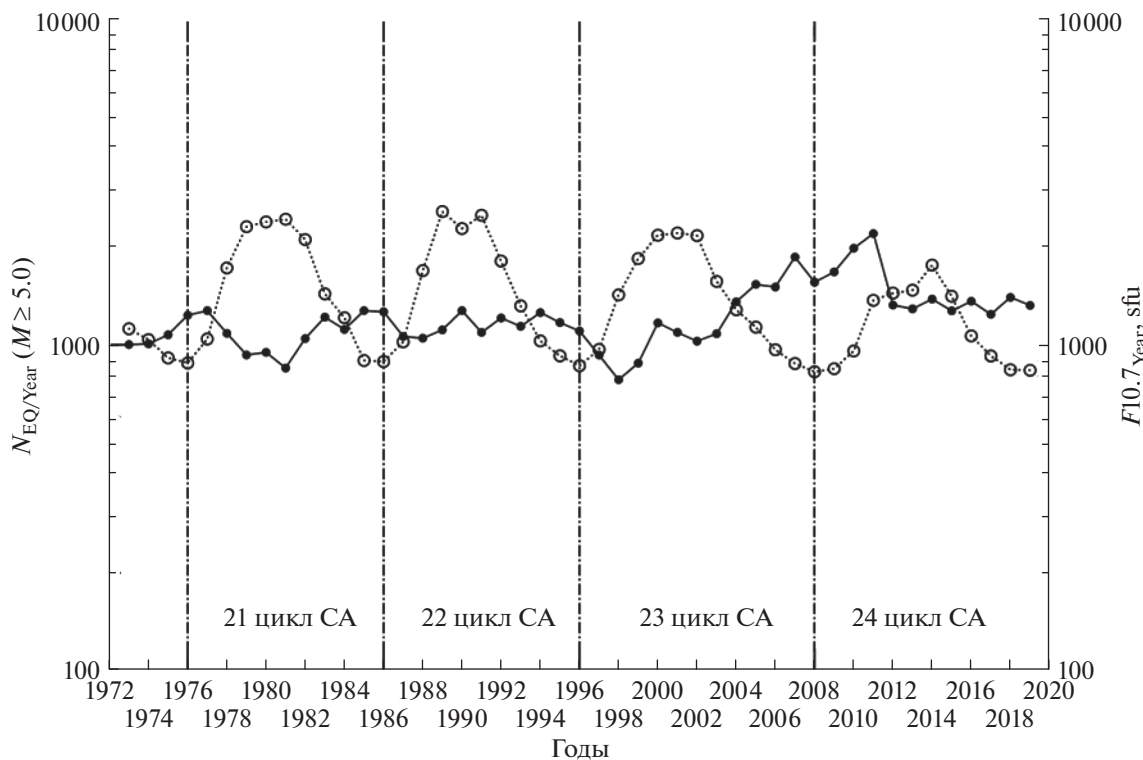


Рис. 2. Поведение $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$ (левая ось ординат, сплошная линия, затемненные кружки) и $F10.7_{Year}$ (правая ось ординат, точечная линия, незатемненные кружки) на временном интервале с 1973 по 2019 гг. (ось абсцисс). Остальные обозначения те же, что и на рис. 1.

products/solar-cycle-progression) Space Weather Prediction Center National Oceanic and Atmospheric Administration, USA.

Интересно отметить следующий момент, что, если сопоставить последовательно коэффициенты корреляции (при том же уровне значимости $\alpha = 0.05$) между $N_{EQ/Year}$ и $F10.7_{Year}$, получаемых по массивам землетрясений с $M \geq 6.0$, $M \geq 5.5$ и $M \geq 5.0$, то можно видеть увеличение абсолютной величины коэффициента корреляции от 0.327 до 0.414, что означает увеличение тесноты обнаруживаемой связи по мере увеличения количества учитываемых землетрясений (рис. 3).

Таким образом, оценка тесноты связи между СА и глобальной САЗ по числу сильных землетрясений в году с $M \geq 5.0$, оказывается наиболее подходящей как с точки зрения возможности учета всех таких землетрясений в каталогах, так и по абсолютной величине полученного коэффициента корреляции. В рамках линейной однофакторной модели получается, что на исследованном временном интервале примерно 17% изменений числа сильных землетрясений во всем мире ($N_{EQ/Year}$ с $M \geq 5.0$) в году может быть объяснено вариациями в $F10.7_{Year}$, т.е. общим уровнем СА.

3. ВАРИАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОТОКА ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С 21-го ПО 24-й ЦИКЛ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ГЛОБАЛЬНАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗЕМЛИ

Наиболее просто в течение циклов СА можно оценить вариации интенсивности ГКЛ по суммарному количеству выделенных Форбуш-понижений в году ($FDS_{Year\Sigma}$). Форбуш-понижения (или Форбуш-эффекты) — это самые разнообразные явления в вариациях ГКЛ (напр., [Lockwood, 1971; Belov, 2009; Абунин и др., 2012]), обусловленные, в основном, выбросами солнечного вещества (СМЕ — *Coronal Mass Ejection*) и/или высокоскоростными потоками солнечного ветра из корональных дыр. Частота и величина Форбуш-понижений отражают изменения СА и могут использоваться для анализа и прогноза всплесков СА [Belov et al., 2008]. Все Форбуш-эффекты, выделенные по данным мировой сети нейтронных мониторов, собраны в базу данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (FEID — *Forbush effects and interplanetary disturbances database*) [Belov et al., 2019; Abunin et al., 2019], совместно со всеми сопутствующими параметрами солнечного ветра, межпланетного магнитного поля, геомагнитной активности и космических

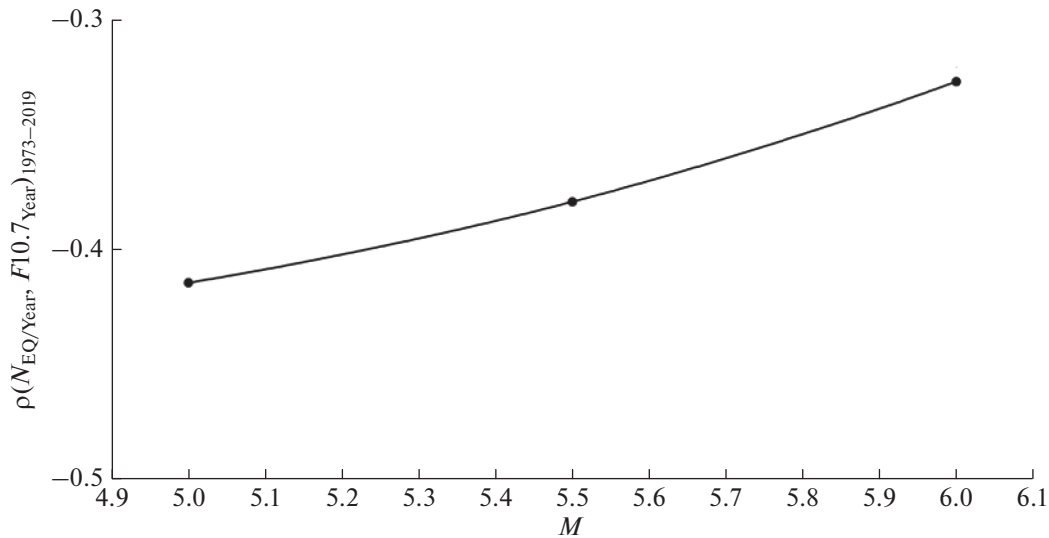


Рис. 3. Изменение коэффициента корреляции (при том же уровне значимости $\alpha = 0.05$ в соответствии со статистикой Стьюдента) между $N_{EQ/Year}$ и $F10.7_{Year}$, получаемые по массивам землетрясений с $M \geq 6.0$, $M \geq 5.5$ и $M \geq 5.0$.

лучей. Параметры космических лучей получены при помощи метода глобальной съемки [Белов и др., 2018; Belov et al., 2018] для фиксированной жесткости частиц 10 ГВ. Открытая сетевая версия базы данных FEID в интернете находится по адресу (<http://spaceweather.izmiran.ru/rus/dbs.html>).

Анализ этой базы данных с 1973 г. по 2018 г. обнаруживает статистически значимый коэффициент корреляции (уровень значимости $\alpha = 0.05$) $\rho\{N_{EQ/Year}(M \geq 5.0), FDS_{Year\Sigma}\} = -0.379$. Квадрат коэффициента корреляции называется коэффициентом детерминации, и он показывает долю вариации результативного признака, объясненную вариацией факторного признака. Такая умеренная антикорреляция означает, что уменьшение интенсивности потока ГКЛ (т.е. $FDS_{Year\Sigma}$ возрастает) приводит примерно в 14% случаев к уменьшению числа сильных землетрясений с $M \geq 5.0$ в году на исследуемом временном интервале.

Количество $FDS_{Year\Sigma}$ отображает понижения интенсивности ГКЛ в разные годы, однако хотелось бы получить более прямую и непосредственную оценку изменений этой интенсивности. Такая оценка может быть получена на основании уравнения (1), которое характеризует изотропную часть вариации интенсивности потоков ГКЛ на фиксированной жесткости 10 ГВ вне атмосферы и магнитосферы Земли (δ_{Year}). На рисунке 4, аналогично рис. 2, дано сравнение поведения $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$ (левая ось ординат, сплошная линия, затемненные кружки) и δ_{Year} (правая ось ординат, пунктирная линия) на временном интервале с 1973 г. по 2019 г. (ось абсцисс).

Для этой пары параметров коэффициент корреляции $\rho\{N_{EQ/Year}(M \geq 5.0), \delta_{Year}\} = 0.459$, т.е. на-

блюдается прямая корреляция при умеренной тесноте связи. На рисунке 5 представлена соответствующая рис. 4 линейная регрессия. Стандартная ошибка регрессии S , характеризующая меру разброса $N_{EQ/Year}$ вокруг линии регрессии, равна 254.08. Соответствующее уравнение регрессии, полученное методом наименьших квадратов, выглядит следующим образом:

$$N_{EQ/Year}(M \geq 5.0) = 24.1203\delta_{Year} + 1410.397, \quad (2)$$

при этом статистическая значимость уравнения регрессии проверена с помощью критерия Фишера. Установлено, что в исследуемой ситуации примерно 21% общей вариабельности $N_{EQ/Year}$ может быть объяснен изменениями δ_{Year} в рамках линейной однофакторной модели.

Оценим теперь тесноту и характер связи между δ_{Year} и $F10.7_{Year}$ на изучаемом нами временном промежутке. На рисунке 6 показано сравнение поведения $F10.7_{Year}$ (левая ось ординат, сплошная линия) и δ_{Year} (правая ось ординат, пунктирная линия) на временном интервале с 1973 г. по 2018 г. (ось абсцисс). Остальные обозначения те же, что и на рис. 1. На глаз отчетливо видна высокая степень антикорреляции.

Как указано выше, в работе [Барляева и др., 2000] получено, что $\rho(I_{ГКЛ}, W) = -0.81$, т.е. наблюдается высокая теснота связи ($0.7 < |\rho| < 0.9$) и антикорреляция между интенсивностью ГКЛ и СА на временном интервале с 1962 по 1995 гг. В данном же анализе получается, что коэффициент линейной корреляции $\rho(\delta_{Year}, F10.7_{Year}) = -0.878$, что хорошо согласуется с результатами этой работы, т.е. в периоды высокой СА падает интенсивность ГКЛ. Т.к. мы используем как меру

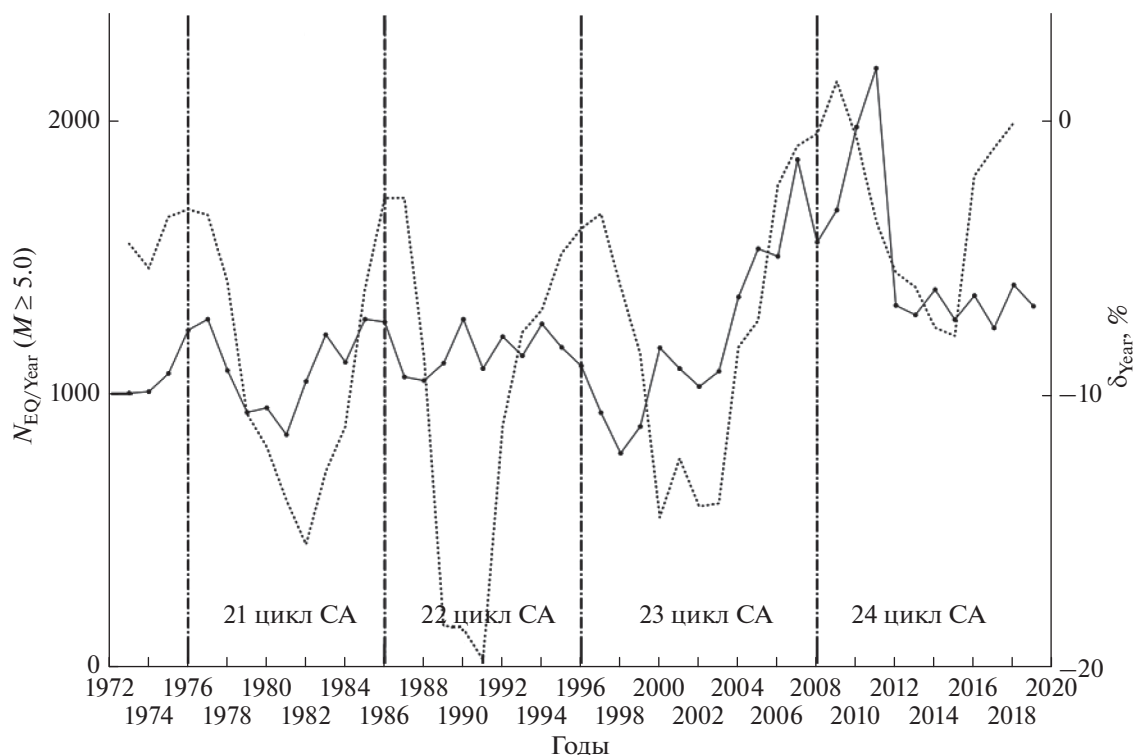


Рис. 4. Поведение $N_{EQ/Year}(M \geq 5.0)$ (левая ось ординат, сплошная линия с точками) и δ_{Year} (правая ось ординат, пунктирная линия) на временном интервале с 1973 по 2019 гг. (ось абсцисс). Остальные обозначения те же, что и на рис. 1.

СА величину $F10.7_{Year}$, а не числа Вольфа (W), необходимо было убедиться, что наш подход дает на выбранном временном промежутке те же результаты, что и давно устоявшиеся. Более того, поскольку $|\rho(\delta_{Year}, F10.7_{Year})| = 0.878 > |\rho(I_{ГКЛ}, W)| = 0.81$, то использование энергетического параметра $F10.7_{Year}$ приводит к увеличению тесноты связи между интенсивностью ГКЛ и СА. Это также свидетельствует в пользу того, что параметры $F10.7_{Year}$ для характеристики СА в нашем рассмотрении и δ_{Year} для характеристики интенсивности потоков ГКЛ выбраны верно.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящей работе общее и сложное понятие “солнечная активность” (СА) описывается количественно только через единственный энергетический параметр – суммарный годовой поток солнечного излучения на длине волны 10.7 см ($F10.7_{Year}$), интегрально характеризующий уровень СА на временном интервале с 21-го по 24-й цикл СА (с 1973 по 2019 гг.), в отличие от чисел Вольфа (W), не являющихся прямым энергетическим параметром. При этом в качестве единственного параметра, характеризующего сейсмическую активность Земли (САЗ) на этом же временном отрезке, выбирается суммарное количество сильных

(магнитуда $M \geq 5.0$) коровых (глубина гипоцентра $0 \leq h \leq 60$ км) землетрясений в году ($N_{EQ/Year}$). Обоснование выбора величины магнитуды $M \geq 5.0$ для землетрясений, отнесенных к “сильным” в нашей работе дано выше в разделе 2. В результате получается, что статистически значимый (при уровне значимости $\alpha = 0.05$ по статистике Стьюдента) коэффициент линейной корреляции $\rho(N_{EQ/Year}, F10.7_{Year}) = -0.414$, т.е. наблюдается антикорреляция с “умеренной” по шкале Чеддока теснотой связи между $N_{EQ/Year}$ и $F10.7_{Year}$ на этом временном отрезке, т.е. подтверждается устойчивая антикорреляция между САЗ и СА, полученная также и другими авторами [Шестопалов и Харин, 2004] на предшествующих более длинных временных отрезках, где в качестве меры уровня СА рассматривались годовые числа Вольфа (W), а САЗ оценивалась по величине годового энерговыделения сейсмической энергии (E) в сильных землетрясениях.

С другой стороны, оказывается, что между САЗ и интенсивностью ГКЛ, оцениваемой по среднегодовой вариации интенсивности потоков галактических космических лучей δ_{Year} (причем δ_{Year} характеризует интенсивность изотропной составляющей потоков ГКЛ вне атмосферы и магнитосферы Земли с фиксированной жесткостью 10 ГВ), наблюдается прямая корреляция с уме-

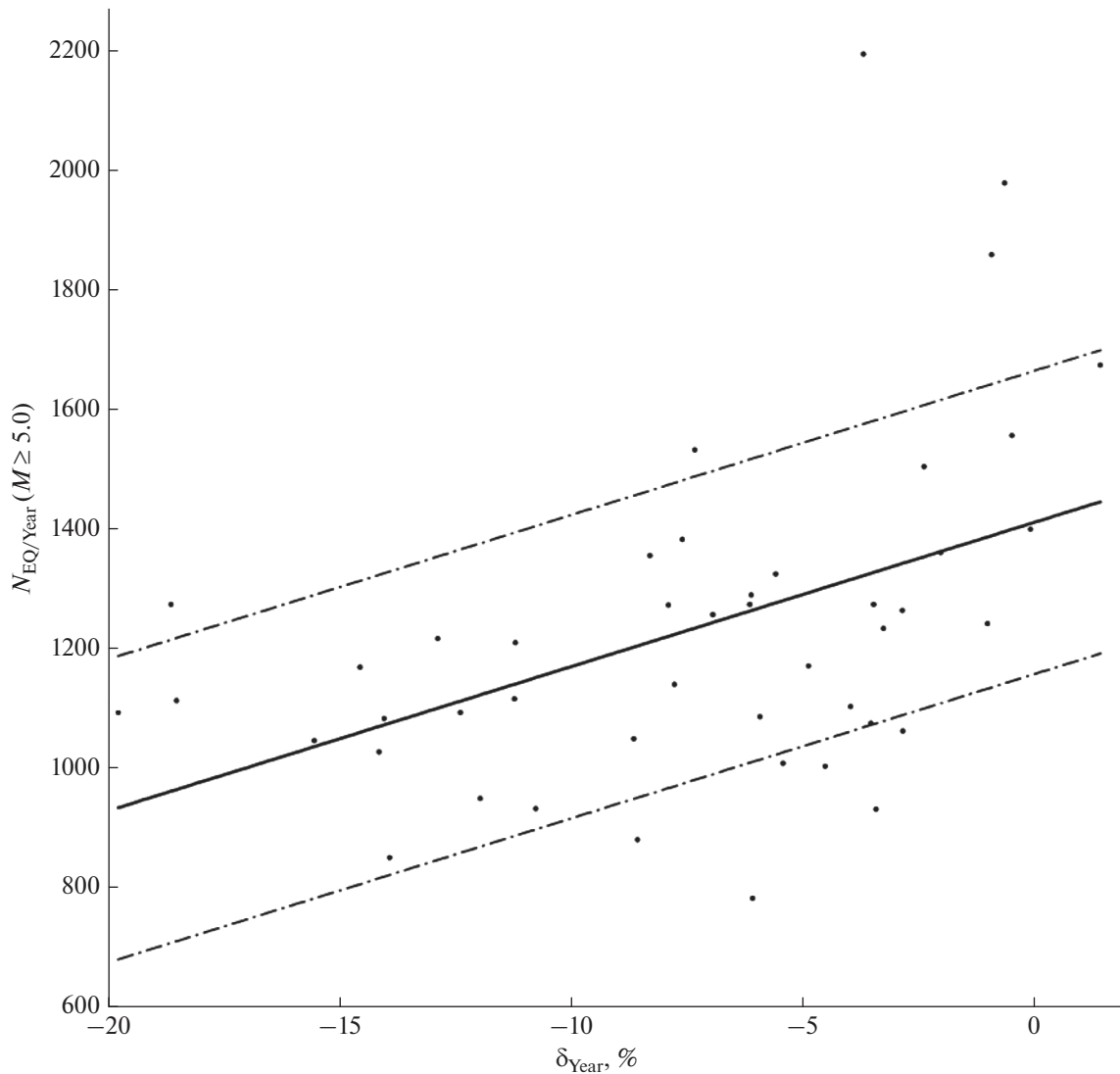


Рис. 5. Линейная регрессия (сплошная линия) для $N_{EQ/Year}$ (результативный признак) и δ_{Year} (факторный признак), полученная по массиву землетрясений с $M \geq 5.0$. Стандартная ошибка регрессии S показана штрихпунктирными линиями.

ренной теснотой связи, при этом коэффициент линейной корреляции $\rho(N_{EQ/Year}, \delta_{Year}) = 0.459$, что по абсолютной величине несколько больше, чем $\rho(N_{EQ/Year}, F10.7_{Year}) = -0.414$. Т.к. $\rho(N_{EQ/Year}, \delta_{Year})^2 = 0.21$, и, следовательно, 21% общей вариабельности $N_{EQ/Year}$ может быть объяснен изменениями δ_{Year} в рамках линейной однофакторной модели.

Таким образом, получается, что при рассмотрении СА и ГКЛ как независимых факторов, формирующих САЗ, $|\rho(N_{EQ/Year}, \delta_{Year})| = 0.459 > |\rho(N_{EQ/Year}, F10.7_{Year})| = 0.414$, т.е. теснота связи между ГКЛ и САЗ (при прямой корреляции) больше, чем между СА и САЗ (при антикорреляции) на изученном интервале времени для массива сильных землетрясений с $M \geq 5.0$. Более того, $\rho(N_{EQ/Year}, \delta_{Year}) = 0.459$ заметно выше, чем

$\rho(N_{EQ/Year}, I_{ГКЛ}) = 0.35$, полученное в работе [Барляева и др., 2000] по массиву землетрясений $M \geq 7.0$, когда в каждом году число учтенных землетрясений примерно на два порядка величины меньше (рис. 1). Т.е. теснота связи между интенсивностью изотропной составляющей потока ГКЛ на фиксированной жесткости 10 ГВ вне атмосферы и магнитосферы Земли и САЗ возрастает по сравнению с оценкой, приведенной в работе [Барляева и др., 2000], в 1.31 раза при прямой корреляции.

С физической точки зрения, очевидно, что ионизация потоками ГКЛ тропосферных уровней в атмосфере Земли непосредственно влияет на формирование облачности, порождая ионные пары и создавая тем самым возможные центры конденсации. Согласно одной из ранних работ [Nico-

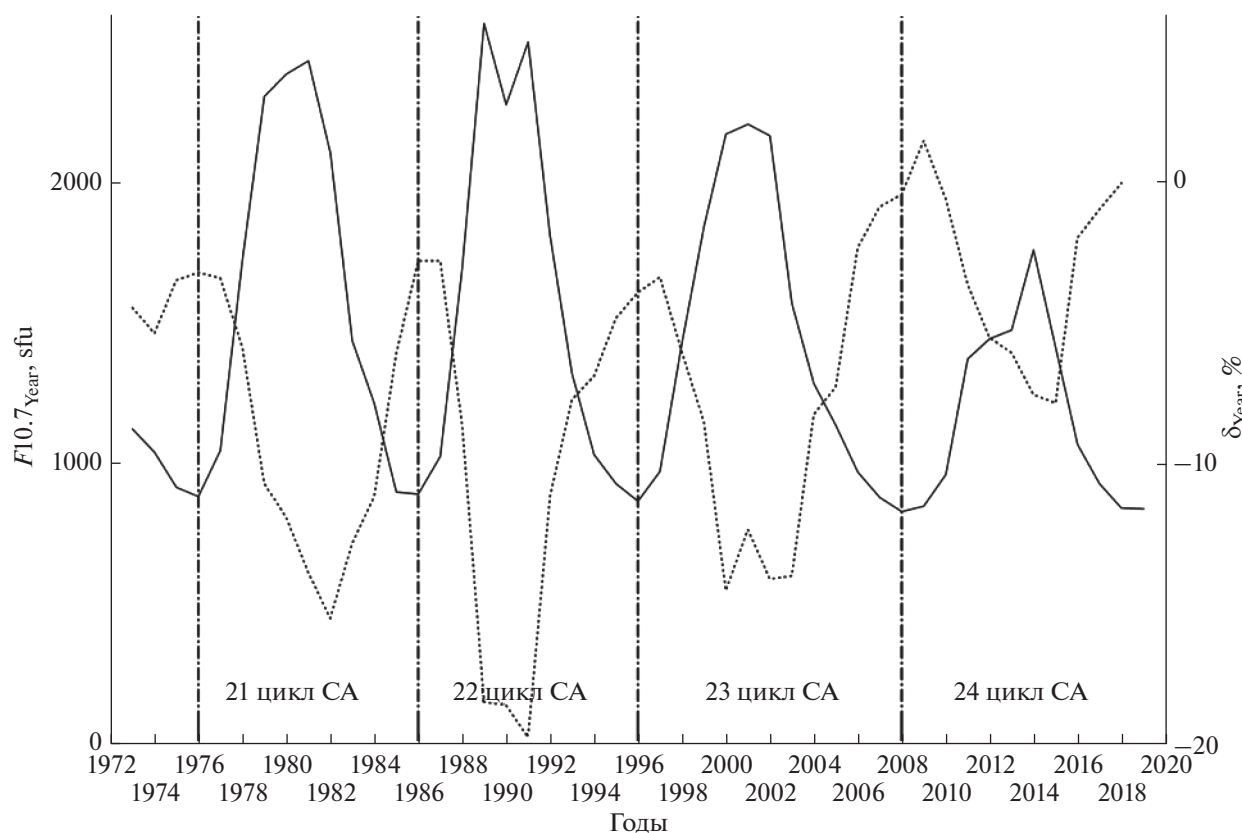


Рис. 6. Поведение $F10.7_{Year}$ (левая ось ординат, сплошная линия) и δ_{Year} (правая ось ординат, пунктирная линия) на временном интервале с 1973 по 2018 гг. (ось абсцисс). Остальные обозначения те же, что и на рис. 1.

let, 1975] оказывается, что оксид азота (NO) образуется в атмосфере в результате ионизации и диссоциации молекулярного азота галактическими космическими лучами. Одна молекула образуется на каждую ионную пару, образованную ионизацией ГКЛ. Пик скорости образования NO (и, соответственно, скорости ионизации) лежит на высоте около 12.5 км (изменение этой высоты показано в работе на рис. 7, и составляет ± 1 км в зависимости от широты и цикла СА), при этом максимальная скорость образования молекул NO (q_{NO}), составляет $40 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$. Как видно из рис. 6 статьи [Nicolet, 1975], для геомагнитных широт (Φ) в диапазоне от 44° до 88° во время минимума СА q_{NO} не падает менее $38 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$, тогда как во время максимума СА эта скорость не превосходит $31 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$. Нетрудно видеть, что относительное изменение этой величины составляет $\Delta = 100 \times (38 - 31) / 31 \cong 22.6\%$, т.е. во время низкой СА скорость образования q_{NO} (и, соответственно, скорость ионизации) на тропосферных уровнях 11.5–13.5 км, на 22.6% выше, чем во время высокой СА. В более поздней работе [Jackman et al., 1980], также приведены высотные профили q_{NO} , получаемые в результате ионизации посредством ГКЛ, для случаев высокой и низкой СА. Для

высоты 10 км получается, что $q_{NO}(\text{ГКЛ max}) \cong 35 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ и $q_{NO}(\text{ГКЛ min}) \cong 43 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$, где max и min обозначают высокий и низкий уровень СА соответственно. Тогда $\Delta = 100 \times (43 - 35) / 35 \cong 22.9\%$, что близко к оценке, полученной по данным [Nicolet, 1975]. Интересно отметить тот факт, что объясняемая за счет вариаций δ_{Year} часть общей варируемости $N_{EQ/Year}$, составляет примерно 21%, что также близко к полученным значениям $\Delta \approx 23\%$.

Формирование нижней облачности происходит в результате взаимодействия множества факторов, в котором ГКЛ являются только одним из них, поэтому не следует ожидать очень высоких положительных коэффициентов корреляции между интенсивностью ГКЛ и количеством облаков во всех солнечных циклах, т.к. изменения интенсивности ГКЛ в циклах СА накладываются на сложные динамические процессы в тропосфере, определяющие циркуляцию в ней. Так, в работе [Веретененко и Огурцов, 2015а] была исследована природа долговременных корреляционных связей, наблюдаемых между аномалиями нижней облачности и потоками ГКЛ на десятилетней временной шкале, а также возможные причины изменения характера этих связей в начале 2000-х гг.

Авторами было показано, что влияние ГКЛ на состояние облачности в умеренных широтах тесно связано с эффектами ГКЛ в вариациях интенсивности внетропического циклогенеза. Высокие значения коэффициентов положительной корреляции между нижней облачностью и потоками ГКЛ, наблюдавшиеся в 1983–2000 гг., обусловлены тем, что в указанный период увеличение потоков ГКЛ сопровождалось усилением циклонической активности в умеренных широтах. Возможной причиной нарушения корреляции между облачностью и потоками ГКЛ в начале 2000-х гг. является обращение знака эффектов ГКЛ в развитии внетропических барических образований в связи с изменением состояния стратосферного циркумполярного вихря.

Таким образом, все барические перестройки в нижней атмосфере происходят на определенном фоне интенсивности потоков ГКЛ, при этом [Веретененко и Огурцов, 2015б] корреляционные связи между состоянием облачности в умеренных широтах и вариациями ГКЛ на десятилетней временной шкале являются опосредованными, т.е. обусловленными влиянием ГКЛ на развитие внетропических барических систем (циклонов и ложбин), формирующих поле облачности.

Тем не менее, естественно предположить, что общая площадь облачности глобально должна возрастать при более высоких величинах потоков ГКЛ. При таких условиях увеличивается вероятность успешного (для активации “созревших” очагов землетрясения) [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 барических структур атмосферы (циклонов и антициклонов с более мощной облачностью) или ростом их количества. Если в этих областях уже существует очаг “созревшего” сильного землетрясения, то такое перекрытие будет “провоцировать” подземный толчок, в соответствии со сценарием, предложенным в работе [Барляева и др., 2000]. В результате глобально будет наблюдаться прямая умеренная корреляция между количеством сильных землетрясений в году $N_{EQ/Year}$ и интенсивностью потоков ГКЛ, которая количественно выражается параметром δ_{Year} в проведенном исследовании. В рамках именно такого сценария концепция А.Д. Сытинского (подробно описана во введении), детализированная в работе [Барляева и др., 2000] и развиваемая в работах [Боков и Сытинский, 2002; Боков, 2011; Боков и др., 2011; Боков и Воробьев, 2014, 2016] получает свое подтверждение на исследованном временном интервале с 1973–2019 гг., а глобальная фоновая САЗ, как показывает проведенное исследование, в значительной мере (примерно на 20%)

определяется вариациями интенсивности ГКЛ, если в качестве меры САЗ выбрано число сильных землетрясений ($M \geq 5.0$) в году. Необходимо указать, что система разломов земной коры и “привязанных” к ним очагов землетрясений имеет геометрически фиксированный, но не регулярный характер. Поэтому необходим благоприятный режим циркуляции в тропосфере для того, чтобы соответствующие основные барические структуры – циклоны и антициклоны (и связанные с ними облачные структуры) эффективно “перекрывали” зоны “созревших” очагов сильных землетрясений [Боков 2011; Боков и др., 2011], способствуя их активации. Вопрос о характерном времени развития (“созревания”) очага землетрясения ранее был подробно рассмотрен в работе [Хегай, 2013].

Отметим здесь также, что, как указано в монографии [Пулинец и др., 2014], чаще всего активные тектонические разломы имеют линейную структуру, которая “отпечатывается” в структуре формирующейся над ними облачностью. Линейные облака или линейные облачные аномалии формируются за несколько суток до сильного землетрясения, но не всегда их появление сопровождается сейсмическим толчком, иногда они отражают активизацию тектонической активности, которая не сопровождается сейсмическим событием.

В заключение необходимо заметить следующее. При анализе рядов данных небольшой длины, в особенности статистическими методами, одним из важнейших факторов является достаточно высокая их надежность. В этом смысле, в проведенной работе, выбор временного интервала для анализа опирается на возможность получения нужных параметров ($F_{10.7Year}$, δ_{Year} , $N_{EQ/Year}$) достаточно современными методами и соответствующей высокой надежностью использованных каталогов.

5. ВЫВОДЫ

1. Проведен корреляционный анализ между числом сильных (магнитуда $M \geq 5.0$) коровых (глубина гипоцентра $0 \leq h \leq 60$ км) землетрясений в году ($N_{EQ/Year}$), отражающим глобальную сейсмическую активность Земли (САЗ) и суммарным годовым потоком солнечного излучения на длине волны 10.7 см ($F_{10.7Year}$), интегрально характеризующим уровень солнечной активности (СА), на временном интервале с 21 по 24 цикл СА (с 1973 по 2019 гг.). Получен статистически значимый (уровень значимости $\alpha = 0.05$ по статистике Стьюдента) коэффициент линейной корреляции $\rho(N_{EQ/Year}, F_{10.7Year}) = -0.414$, в соответствии с величиной которого наблюдается антикорреляция с умеренной по шкале Чеддока теснотой связи

$0.3 < |\rho| < 0.5$. Этот результат согласуется с полученными ранее другими исследователями значений ρ на более коротких и более длинных промежутках времени при оценке связи САЗ с СА, когда в качестве меры СА выбираются числа Вольфа (W).

2. Рассмотрена корреляция между $N_{EQ/Year}$ и среднегодовой вариацией интенсивности галактических космических лучей δ_{Year} . Показано, что на том же временном интервале и с тем же уровнем значимости, $\rho(N_{EQ/Year}, \delta_{Year}) = 0.459$ и наблюдается прямая корреляция, так же с умеренной теснотой связи. Это позволяет объяснить ~20% общей вариабельности $N_{EQ/Year}$ (результативный признак) изменениями δ_{Year} (факторный признак) в рамках линейной однофакторной модели. При этом, $\rho(N_{EQ/Year}, \delta_{Year}) = 0.459$ заметно выше, чем $\rho(N_{EQ/Year}, I_{ГКЛ}) = 0.35$, полученное в работе [Барляева и др., 2000] по массиву землетрясений с $M \geq 7.0$, и теснота связи между интенсивностью изотропной составляющей потока ГКЛ на фиксированной жесткости 10 ГВ вне атмосферы и магнитосферы Земли и САЗ возрастает по сравнению с оценкой, сделанной в работе [Барляева и др., 2000], в 1.31 раза при прямой корреляции. Это количественно свидетельствует в пользу усиления концепции, предложенной в работе [Барляева и др., 2000] и развитой в работах [Боков и Сытинский, 2002; Боков и др., 2011; Боков и Воробьев, 2014, 2016].

3. Получено, что при рассмотрении СА и ГКЛ как независимых факторов, формирующих САЗ, $|\rho(N_{EQ/Year}, \delta_{Year})| = 0.459 > |\rho(N_{EQ/Year}, F10.7_{Year})| = 0.414$, т.е. теснота связи между ГКЛ и САЗ (при прямой корреляции) больше, чем между СА и САЗ (при антикорреляции) на изученном интервале времени для массива сильных землетрясений с $M \geq 5.0$.

4. Детализируя далее сценарий, предложенный в работе [Барляева и др., 2000], и получивший свое развитие в работах [Боков и Сытинский, 2002; Боков, 2011; Боков и др., 2011; Боков и Воробьев, 2014, 2016], авторы предполагают, что (вследствие глобального возрастания в среднем общей площади облачности при более высоких величинах потоков ГКЛ при благоприятном режиме глобальной циркуляции в тропосфере) увеличивается вероятность перекрытия областей активных разломов земной коры (и прилегающих к ним зон сильных землетрясений) основными барическими структурами атмосферы – циклонами и антициклонами (и связанными с ними облачными образованиями). Если в общих зонах перекрытия указанных областей уже существует очаг “созревшего” сильного землетрясения, то такое перекрытие (при благоприятных обстоятельствах) [Боков, 2011; Боков и др., 2011], может “спровоцировать” подземный толчок. В итоге,

глобально, будет наблюдаться прямая умеренная корреляция между числом сильных землетрясений в году $N_{EQ/Year}$ и интенсивностью ГКЛ, которая количественно выражается параметром δ_{Year} в проведенном исследовании, характеризующим интенсивность изотропной составляющей потока ГКЛ на фиксированной жесткости 10 ГВ вне атмосферы и магнитосферы Земли, полученная методом глобальной съемки по данным всей мировой сети нейтронных мониторов.

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 NMDDB (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 поддержана Российским научным фондом, грант № 20-72-10023 (Абунин А.А., Абунина М.А., Белов А.В. – Выводы № 2 и 3) и Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 18-52-34004 (Абунин А.А. – Вывод № 1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абунин А.А., Абунина М.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Форбуш-эффекты с внезапным и постепенным началом // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 52. № 3. С. 313–320. 2012.
- Апродов В.А. Зоны землетрясений. М.: Мысль, 461 с. 2000.
- Барляева Т.В., Морозова А.Л., Пудовкин М.И. Влияние космических факторов на развитие землетрясений // Сб.: 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, Москва. С. 8–19. 2000.
- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.Г., Оленева В.А., Абунина М.А., Абунин А.А. Метод глобальной съемки

- для мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 3. С. 374–389. 2018. <https://doi.org/10.7868/S0016794018030082>
- *Боков В.Н., Сытинский А.Д.* Оперативный краткосрочный прогноз землетрясений на основе сейсмо-синоптического метода (результаты годового испытания) // Сб.: Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций и их источников. Научно-практическая конференция. 26–27 июня 2001 г. МЧС России, Центр “Антистихия”, Москва. С. 34–39. 2002.
- *Боков В.Н.* Когда содрогнется Земля? Краткосрочные прогнозы землетрясений // Наука и жизнь. № 9. С. 47–57. 2011.
- *Боков В.Н., Гутшабаш 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.
- *Веретененко С.В., Огурицов М.Г.* Природа долговременных корреляционных связей между состоянием облачности и вариациями потока галактических космических лучей // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55. № 4. С. 457–465. 2015а. <https://doi.org/10.7868/S0016794015040148>
- *Веретененко С.В., Огурицов М.Г.* О возможных причинах нарушения корреляционных связей между состоянием облачности и потоками галактических космических лучей // Изв. РАН. Сер. Физ. Т. 79. № 5. С. 750–752. 2015б. <https://doi.org/10.7868/S0367676515050440>
- *Ишков В.Н.* Периоды “пониженной” и “повышенной” солнечной активности: наблюдательные особенности и ключевые факты // Сб. “Солнечная и солнечно-земная физика-2013”, под ред. Ю.А. Наговицина, Санкт-Петербург: Изд. ВВМ, С. 111–114. 2013.
- *Пулинец С.А., Узунов Д.П., Давиденко Д.В., Дудкин С.А., Цадиковский Е.И.* Прогноз землетрясений возможен?! М.: “Тривант”, 144 с. 2014.
- *Сытинский А.Д.* О возможности влияния солнечной активности на сейсмичность Земли // Бюлл. Совета по сейсмологии АН СССР. № 15. С. 47–52. 1963.
- *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 аэрономия. Т. 43. № 1. С. 136–142. 2003.
- *Хегай В.В.* Эволюция очага и зоны подготовки корового землетрясения: упрощенное феноменологическое описание // Наука и технологические разработки (НТР). Т. 92. № 4. С. 19–30. 2013. http://std.ifz.ru/fileadmin/user_upload/documents/journals/std/92-4/02-STD-92-4.pdf
- *Хегай В.В.* О корреляции между сильными землетрясениями и уровнем солнечной активности в 21, 22 и 23 циклах // Астрономия-2018. Том 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>
- *Шебалин Н.В.* Сильные землетрясения. Избранные труды. М.: Изд. Академии горных наук. 542 с. 1997.
- *Шестопалов И.П., Харин Е.П.* О связи сейсмичности Земли с солнечной и геомагнитной активностью // Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений, III Междунар. конф. с. Паратунка Камч. обл. 16–21 августа 2004/ сб. докл. Петропавловск – Камч.: ИКИР ДВО РАН. С. 130–141. 2004.
- *Abunin A.A., Abunina M.A., Belov A.V., Gaidash S.P., Eroshenko E.A., Pryamushkina I.I., Trefilova L.A., Gamza E.I.* Database capabilities for studying Forbush-effects and interplanetary disturbances // J. Phys. Conf. Series. V. 1181. ID012062. 2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1181/1/012062>
- *Belov A. V.* Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena / Proc. IAU Symp № 257. P. 119–130. 2009.
- *Belov A., Eroshenko E., Oleneva V., Yanke V.* Connection of Forbush effects to the X-ray flares // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 70. № 2–4. P. 342–350. 2008.
- *Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Oleneva V., Abunin A., Abunina M., Papaioannou A., Mavromichalaki H.* The Global Survey Method applied to ground-level cosmic ray measurements // Solar Phys. V. 293. I. 4. № 68. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11207-018-1277-6>
- *Belov A., Abunin A., Eroshenko E., Abunina M., Yanke V., Oleneva V.* Virtual laboratory for the comprehensive analysis of Forbush-effects and interplanetary disturbances // VarSITI Newsletter. V. 21. P. 1–3. 2019.
- *Cane H.* Coronal mass ejections and Forbush decreases // Space Sci. Rev. V. 93. № 1/2. P. 55–77. 2000.
- *Jackman C.H., Frederick I.E., Stolarski R.S.* Production of odd nitrogen in the stratosphere and mesosphere: an intercomparison of source strength // J. Geophys. Res. V. 85. № 12. P. 7495–7505. 1980.
- *Lockwood J.A.* Forbush decreases in the cosmic radiation // Space Sci. Rev. V. 12. № 5. P. 658–715. 1971.
- *Nicolet M.* On the production of nitric oxide by cosmic rays in the mesosphere and stratosphere // Planet. Space Sci. V. 23. № 4. P. 637–649. 1975. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(75\)90104-X](https://doi.org/10.1016/0032-0633(75)90104-X)
- *Pudovkin M.I., Veretenenko S.V.* Cloudiness decreases associated with Forbush-decreases of galactic cosmic rays // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 57. № 11. P. 1349–1355. 1995.
- *Reid H.F.* The Mechanics of the Earthquake. The California Earthquake of April 18, 1906; Report of the State Investigation Commission. V. 2, Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C., 206 p. 1910.
- *Yasue S., Mori S., Sakakibara S., Nagashima K.* Coupling coefficients of cosmic ray daily variations for neutron monitor stations. Nagoya: Nagoya, 225 p. № 7. 1982.