
ГОРНЫЕ РАЙОНЫ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ КАК ПЛОЩАДКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

MOUNTAINOUS REGIONS OF THE RUSSIAN ARCTIC AS A PLATFORM FOR SPACE WEATHER RESEARCH

С.А. Сирук

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия, sstepana001@mail.ru

С.Ю. Александрин

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия, SYaleksandr@mephi.ru

И.А. Лагойда

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия, IALagoida@mephi.ru

А.Г. Майоров

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия, agmayorov@mephi.ru

Р.Ф. Юлбарисов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия, RFYulbarisov@mephi.ru

S.A. Siruk

National Research Nuclear University MEPHI,
Moscow, Russia, sstepana001@mail.ru

S.Yu. Aleksandrin

National Research Nuclear University MEPHI,
Moscow, Russia, SYaleksandr@mephi.ru

I.A. Lagoida

National Research Nuclear University MEPHI,
Moscow, Russia, IALagoida@mephi.ru

A.G. Mayorov

National Research Nuclear University MEPHI,
Moscow, Russia, agmayorov@mephi.ru

R.F. Yulbarisov

National Research Nuclear University MEPHI,
Moscow, Russia, RFYulbarisov@mephi.ru

Аннотация. В силу особенностей строения магнитного поля Земли ее приполярные области наиболее восприимчивы к вариациям потока космических лучей и другим проявлениям космической погоды. Расположенные в таких районах возвышенности особенно перспективны с точки зрения изучения этих явлений. В настоящее время в мире действуют две наземные обсерватории, отличающиеся повышенной чувствительностью к проявлениям солнечной активности, и обе они находятся в Антарктиде. В Российской Арктике имеется несколько горных районов, геофизические условия в которых схожи с таковыми на Антарктическом ледяном щите. Работа посвящена расчету физических величин, определяющих условия мониторинга космической погоды в этих районах, и рассмотрению вопроса о целесообразности строительства новых научных станций в этих местах. Показано, что установка новых станций приведет к повышению чувствительности сети обсерваторий к проявлениям солнечной и геомагнитной активности, в частности к росту числа регистрируемых солнечных протонных событий.

Ключевые слова: Арктика, космическая погода, космические лучи, солнечная активность, солнечная модуляция, наземные возрастания, нейтронные мониторы.

Abstract. Due to the structural features of the geomagnetic field, Earth's subpolar regions are the most affected by cosmic ray variations and other space weather phenomena. High grounds located in these regions are especially promising in terms of space weather research. Nowadays, there are only two high-altitude subpolar space weather observatories highly sensitive to solar activity, both located in Antarctica. In the Russian Arctic, we have several mountainous regions with geophysical conditions similar to that of the Antarctic ice sheet. In this paper, we calculate physical quantities that determine conditions for space weather observation in these regions and explore the expediency of building new scientific stations there. We show that establishment of the stations would enhance sensitivity of space weather observatory network and increase the number of detectable solar proton events.

Keywords: the Arctic, space weather, cosmic rays, solar activity, solar modulation, ground-level enhancements, neutron monitors.

ВВЕДЕНИЕ

Космическая погода — совокупность характеристик межпланетной среды и протекающих в ней процессов, воздействующих на Землю и влияющих на деятельность человека. В их число входит радиационная обстановка в околоземном пространстве, обусловленная космическими лучами (КЛ) — потоками частиц с высокой энергией. Большая часть КЛ рождается либо в нашей галактике, либо генерируется Солнцем, в связи с чем их принято называть галактическими КЛ (ГКЛ) и солнечными КЛ (СКЛ) соответственно. Потоки частиц обоих типов подвержены влиянию солнечной и геомагнитной активности и непрерывно меняются во времени. Всплески потока СКЛ, известные как солнечные протонные события (СПС), являются следствием солнечных вспышек и корональных выбросов массы [Reames, 1999], тогда как модуляция потока ГКЛ обусловлена их взаимодействием с солнечным ветром и структурами в межпланетном магнитном поле [Potgieter, 2013]. СПС, в которых поток и энергия частиц оказываются достаточными, чтобы событие было зарегистрировано наземными детекторами, выделяются в отдельный класс — наземные возрастания (Ground-Level Enhancements, GLEs) [Poluianov et al., 2017].

Космические лучи играют существенную роль в жизни людей и протекании многих физических процессов на Земле, являясь основным источником как ионизации в нижней и средней атмосфере [Bazilevskaya et al., 2008], так и радиационной нагрузки в космосе [Chen et al., 2023]. Мониторинг потока космических лучей осуществляется с помощью космических аппаратов и наземных установок, например нейтронных мониторов (НМ) [Simpson, 2000].

В настоящее время в России ведется активное освоение Арктики, которая, в силу особенностей строения магнитного поля Земли, оказывается подвержена влиянию космической погоды в наибольшей степени. Строительство новых научных станций в Арктической зоне РФ позволит получать уникальную информацию о проявлениях солнечной и геомагнитной активности, а также вести мониторинг состояния окружающей среды на осваиваемых территориях.

1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ КЛ В МАГНИТОСФЕРЕ И АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Чтобы наземная установка зарегистрировала приход КЛ, они должны пройти сквозь магнитосферу Земли и провзаимодействовать с молекулами и атомами воздуха, после чего образовавшиеся вторичные частицы должны преодолеть толщу атмосферы над прибором. Таким образом, каждую точку на поверхности Земли можно охарактеризовать с помощью следующих понятий: асимптотический конус приема частиц [Rao et al., 1963], жесткость геомагнитного обрезания R_c [Gerontidou et al., 2021] и энергия атмосферного обрезания E_c [Poluianov, Batalla, 2022].

Большие значения R_c и E_c принимаются за энергетический порог для регистрируемых частиц.

Величина R_c определяется структурой геомагнитного поля и принимает значения от нуля на магнитных полюсах до 15–20 ГВ вблизи магнитного экватора [Gerontidou et al., 2021]. Величина E_c зависит от толщины атмосферы h , выраженной в г/см², и изначально была найдена эмпирическим методом. В результате ряда экспериментов, известных как широтные обзоры [Nuntiyakul et al., 2018], было показано, что на уровне моря энергия атмосферного обрезания принимает значение порядка 430 МэВ, что соответствует жесткости в 1 ГВ в случае протонов КЛ. Таким образом, для наземных установок, расположенных в области с $R_c < 1$ ГВ, атмосферное обрезание преобладает над геомагнитным и энергетический порог регистрируемых частиц определяется тем, как высоко прибор расположен. Такие детекторы принято называть полярными.

В работе [Poluianov, Batalla, 2022] результаты широтных обзоров были использованы для калибровки метода определения энергии атмосферного обрезания в зависимости от толщины атмосферы. Было показано, что энергия атмосферного обрезания меняется от 430 МэВ на уровне моря до приблизительно 280 МэВ при $h = 500$ г/см², что соответствует высоте порядка 5.5 км над уровнем моря. Поскольку чувствительность потока КЛ к проявлениям солнечной активности возрастает с уменьшением энергии частиц, высокогорные полярные детекторы оказываются особенно восприимчивы к вариациям потока ГКЛ и к СПС.

2. РАСШИРЕНИЕ СЕТИ НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ

Долгое время единственным высокогорным полярным нейтронным монитором являлся НМ SOPO, однако в 2015 г. на Антарктическом ледяном щите был установлен НМ DOMC. В том же году очередное GLE было зарегистрировано только этими двумя детекторами, обладающими повышенной чувствительностью к КЛ низких энергий [Poluianov et al., 2017]. Таким образом, строительство высокогорной полярной обсерватории привело к введению нового класса событий — так называемых sub-GLE [Poluianov et al., 2017]. Помимо DOMC и SOPO, повышенной чувствительностью к вариациям потока КЛ обладают еще несколько НМ. Например, не функционирующий сейчас НМ VSTK [Poluianov et al., 2024]. НМ SNAE располагается выше уровня моря, но недостаточно высоко для полноценной регистрации sub-GLE. В работе [Mishev, Usoskin, 2020] было предложено установить новый нейтронный монитор SUMT на исследовательской станции в Гренландии. Для краткости, все вышеперечисленные НМ будут именоваться «существующие».

В Российской Арктике есть несколько мест, условия для наблюдения КЛ в которых схожи с таковыми на Антарктическом и Гренландском ледяных щитах. На рис. 1, а эти локации отмечены кругами, а существ-

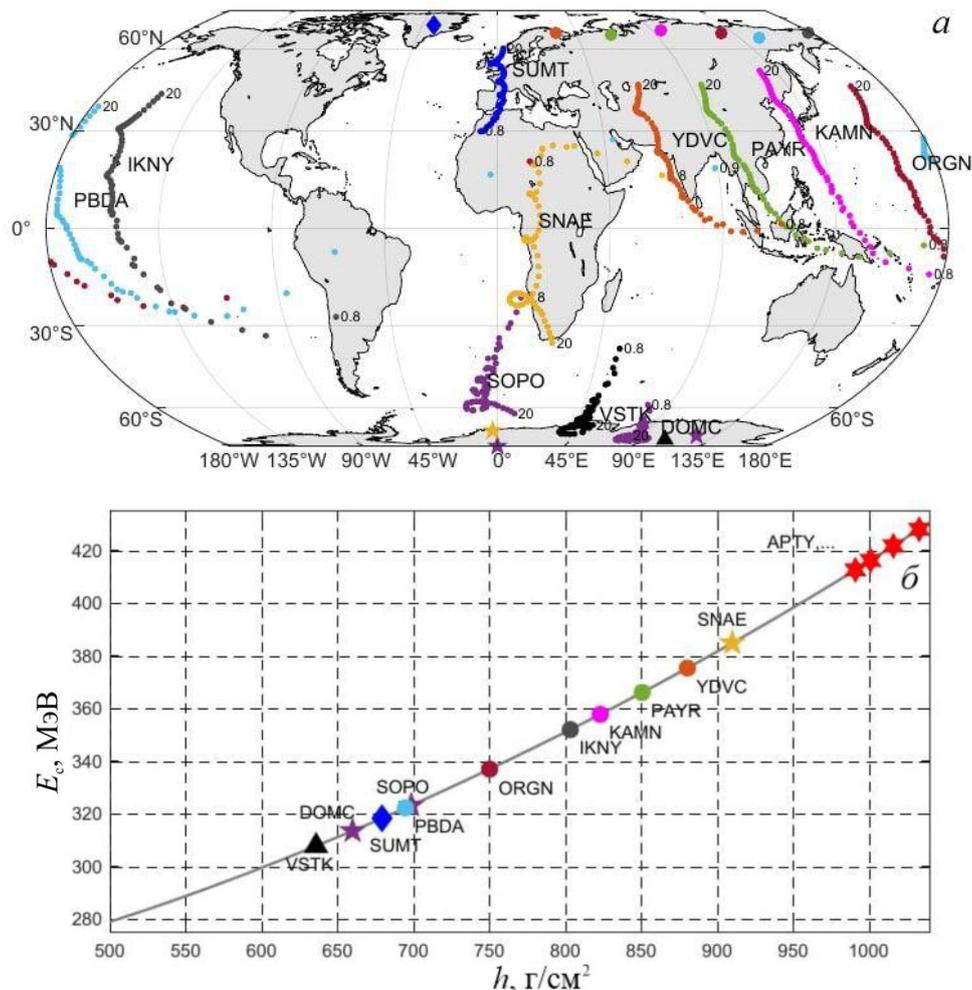


Рис. 1. Географическое положение нейтронных мониторов и их асимптотические направления приема вертикально падающих частиц (а), а также энергия атмосферного обрезания в местах расположения нейтронных мониторов (б)

вующие НМ — пятиконечными звездами, треугольником и ромбом. Гора Юдычвумчорр (YDVC) является высочайшей в Хибинах и обладает плоской вершиной; у подножия горного массива находятся г. Апатиты, где располагается действующий нейтронный монитор, и г. Кировск, из которого в горы можно подняться на подъемниках. Гора Пайер (PAYR) является высшей точкой Полярного Урала, и ее вершина также представляет собой плато. На расстоянии порядка 60 км от пика расположены п. Харп и железнодорожная станция, а к подножию гор тянутся вседорожные дороги.

Гора Камень (KAMN) является высшей точкой плато Путорана, ближайший крупный населенный пункт — г. Норильск. Гора Победа (PBDA) — высочайшая вершина хребта Черского и Северо-Востока России, на расстоянии 50 км от которой располагается с. Сасыр. «Камень» и «Победа» расположены на территориях Путоранского заповедника и Момского природного парка соответственно, что может существенно усложнить строительство новых станций в этой местности. Хребет Орулган (ORGN) входит в состав природного резервата «Орулган-Сис»; ближайшие населенные пункты, до которых можно добраться самолетом или по зимнику, расположены в 150 км от горного массива. Наконец, высшая точка

Чукотского нагорья — гора Исходная (IKNY) является крайне труднодоступной. Один из ближайших населенных пунктов — расположенный на расстоянии порядка 200 км п. Мыс Шмидта, на территории которого действует геофизическая обсерватория с одноименным нейтронным монитором. Таким образом, с точки зрения возможности строительства и последующего обеспечения наиболее перспективными являются обсерватории YDVC и PAYR.

Более детальная информация о НМ представлена в таблице. Средняя толщина атмосферы в местах расположения НМ получена с использованием MATLAB Aerospace Toolbox [<https://www.mathworks.com/products/aerospace-toolbox.html>], значения эффективной вертикальной жесткости геомагнитного обрезания рассчитаны с помощью инструмента ИЗМИРАН [<https://tools.izmiran.ru/cutoff>] для 2030 г. с использованием модели IGRF для главного поля [Alken et al., 2021] и модели TS89 с $K_p=1$ для внешнего поля [Tsyganenko, 1989]. Для определения энергии атмосферного обрезания проведена интерполяция результатов расчетов, представленных в работе [Poluianov, Batalla, 2022], полиномами третьей степени (серая линия на рис. 1, б).

Для всех НМ рассчитаны асимптотические направления приема вертикально падающих частиц с жест-

Характеристики нейтронных мониторов

Географический объект	Сокращение	Широта, град.	Долгота, град.	Высота, м	h , г/см ²	E_c , МэВ	R_c , ГВ
Существующие НМ							
ст. «Южный полюс»	SOPO	-90.00	0	2820	698	323	0.36
ст. «Купол С»	DOMC	-75.06	123.20	3233	660	314	0.19
ст. «Санаэ IV»	SNAE	-71.67	-2.85	856	910	385	0.47
ст. «Лагерь Саммит»	SUMT	72.34	-38.27	3126	679	318	0.31
ст. «Восток»	VSTK	-78.47	106.87	3488	636	308	0.21
Предлагаемые НМ							
Юдычвумчорр	YDVC	67.73	33.47	1200	880	375	0.34
Пайер	PAYR	66.72	64.38	1472	851	366	0.51
Камень	KAMN	69.13	95.07	1701	822	358	0.47
Высшая точка хребта Орулган	ORGN	67.58	128.13	2409	750	337	0.56
Победа	PBDA	65.17	146.00	3003	695	322	0.83
Исходная	IKNY	67.82	178.28	1887	803	352	0.49

костью в пределах от 0.8 ГВ до 20 ГВ. Соответствующие направления изображены на рис. 1, а точками, цвет которых соответствует метке станции. Существующие НМ, а также НМ YDVC, PAYR и KAMN имеют относительно узкие конусы приема частиц, в то время как конусы приема НМ ORGN, PBDA и IKNY вытянуты по долготе. С установкой новых детекторов к паре НМ SOPO+DOMC добавляются такие варианты регистрации sub-GLE, как SNAE+YDVC, YDVC+PAYR, PAYR+KAMN и PBDA+SNAE. На рис. 1, б приведены значения энергии обрезания в зависимости от толщины атмосферы для всех существующих и предлагаемых станций. Энергии обрезания для полярных НМ, расположенных вблизи уровня моря, схематично изображены шестиконечными звездами. НМ PBDA находится на одном уровне чувствительности с SOPO, в то время как остальные предложенные детекторы занимают промежуточное положение между SOPO и SNAE.

Чтобы проверить, насколько эффективными являются предложенные НМ при регистрации СПС, проведен расчет отклика детекторов на три события, спектры которых представлены на рис. 2, а. Угловое распределение СПС предполагалось изотропным, в то время как параметры энергетических спектров для GLE 71 и sub-GLE взяты из работ [Mishev et al., 2014, 2017] соответственно. Для оценки статистической значимости сигнала отклик на СПС приведен в единицах σ_{GCR} , представляющих собой статистическую погрешность отклика НМ на поток ГКЛ, являющийся в данном случае фоном. Спектр ГКЛ задается с помощью приближения силового поля [Gleeson, Axford, 1968] с потенциалом солнечной модуляции 1 ГВ. Считается, что набор статистики производится в течение минуты стандартным модулем 6NM64, отклик прибора вычислен с использованием функции, представленной в [Mishev et al., 2020].

Результаты расчета представлены на рис. 2, б. Шестиконечными звездами обозначены отклики на

СПС полярного НМ, расположенного на уровне моря. В случае слабого GLE 71 все приборы регистрируют статистически значимое увеличение темпа счета. Если говорить об относительно сильном sub-GLE 07.03.2012, то нейтронный монитор, расположенный на уровне моря, а также НМ обсерватории SNAE не зафиксировали это событие с достоверностью на уровне $3\sigma_{GCR}$, в то время как сигнал, регистрируемый остальными станциями, остается статистически значимым. В случае слабого sub-GLE 29.10.2015 большинству НМ, предложенных для установки на территории Российской Арктики, также не хватает чувствительности для его достоверной регистрации, и лишь PBDA демонстрирует чувствительность на уровне антарктических станций. Можно заключить, что установка новых высокогорных полярных НМ на территории Российской Арктики действительно привела бы к увеличению числа регистрируемых СПС.

3. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Помимо нейтронных мониторов, на научной станции могут быть установлены приборы, чувствительные к другим компонентам вторичного космического излучения, например, детекторы нейтронов более низких энергий [Nuntiyakul et al., 2018] и мюонные телескопы [Kato et al., 2021]. Потоки излучения разных типов по-разному реагируют на особенности окружающей среды, что позволяет как получать больше информации о КЛ, так и выявлять на их фоне другие явления.

Другим вариантом могли бы стать магнитометры. С одной стороны, возмущения магнитного поля Земли, возникающие вследствие взаимодействия магнитосферы с потоками солнечного ветра, сильнее всего проявляются в приполярных широтах, и новая геомагнитная обсерватория могла бы дополнить сеть INTERMAGNET, испытывающую недостаток в изме-

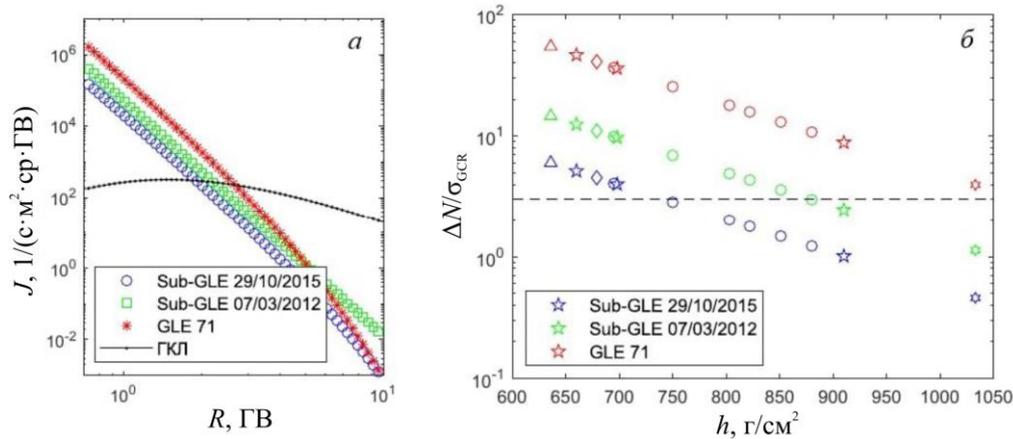


Рис. 2. Энергетические спектры солнечных протонных событий и галактических космических лучей (а); статистическая значимость отклика рассматриваемых нейтронных мониторов на солнечные протонные события (б)

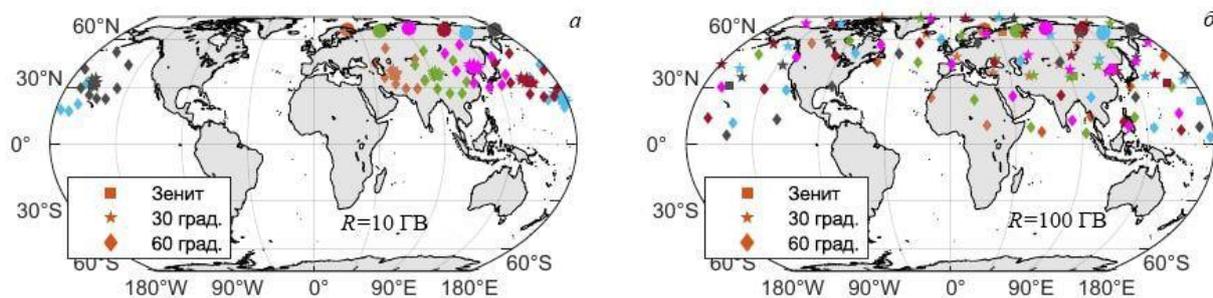


Рис. 3. Асимптотические направления приема частиц с жесткостью 10 ГВ (а) и 100 ГВ (б), приходящих под разными углами

рениях на территории Российской Арктики [<https://intermagnet.org/metadata/#/map>]. С другой стороны, совместный мониторинг потока космических лучей и геомагнитной активности может быть полезен при изучении явлений космической погоды [Данилова и др., 2023].

В качестве примера на рис. 3 изображены асимптотические направления приема частиц мюонными телескопами, расположенными в тех же местах, что и предлагаемые НМ. Расчет проводился для частиц с жесткостью 10 ГВ (а) и 100 ГВ (б), падающих вертикально, а также под зенитными углами в 30° и 60°. Для каждого зенитного угла учитывалось восемь азимутальных направлений с шагом в 45°. В случае частиц с жесткостью 10 ГВ асимптотические направления образуют узкие конусы и каждый мюонный телескоп просматривает определенный участок небесной сферы. Для частиц с жесткостью 100 ГВ разброс асимптотических направлений оказывается гораздо сильнее и конусы приема мюонных телескопов покрывают практически все Северное полушарие. Таким образом, данные новых мюонных телескопов, расположенных в этих местах, могут эффективно дополнить измерения существующих детекторов [Kato et al., 2021].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена идея строительства новых обсерваторий для мониторинга космической погоды в Арктической зоне РФ. Рассмотрены несколько

вариантов расположения обсерваторий, проведены расчеты физических величин, характеризующих условия наблюдения проявлений солнечной и геомагнитной активности в этих локациях. Восстановлены асимптотические направления приема частиц, промоделирован отклик потенциальных детектирующих установок на солнечные протонные события различной интенсивности. Можно заключить, что установка новых научных станций позволит существенно повысить чувствительность сети наземных детекторов к проявлениям космической погоды.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-72-10170-П «Исследование периодических и спорадических вариаций космических лучей на базе данных спутниковых и наземных экспериментов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилова О.А., Птицына Н.Г., Тясто М.И., Сдобнов В.Е. Изменения жесткостей обрезания космических лучей во время бури 8–11 марта 2012 г. в период CAWSES-II. *Солнечно-земная физика*. 2023, т. 9, № 2, с. 86–93. DOI: [10.12737/szf-92202310](https://doi.org/10.12737/szf-92202310) / Danilova O.A., Ptitsyna N.G., Tyasto M.I., Sdobnov V.E. Variations in cosmic ray cutoff rigidities during the March 8–11, 2012 magnetic storm (CAWSES II period). *Solar-Terrestrial Physics*. 2023, vol. 9, iss. 2, pp. 81–87. DOI: [10.12737/szf-92202310](https://doi.org/10.12737/szf-92202310).
- Alken P., Thébault E., Beggan C.D., et al. International geomagnetic reference field: The thirteenth generation. *Earth, Planets and Space*. 2021, vol. 73, pp. 1–25. DOI: [10.1186/s40623-020-01288-x](https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x).

- Bazilevskaya G.A., Usoskin I.G., Flückiger E.O., et al. Cosmic ray induced ion production in the atmosphere. *Space Sci. Rev.* 2008, vol. 137, pp. 149–173. DOI: [10.1007/s11214-008-9339-y](https://doi.org/10.1007/s11214-008-9339-y).
- Chen X., Xu S., Song X., et al. Astronaut radiation dose calculation with a new galactic cosmic ray model and the AMS-02 data. *Space Weather*. 2023, vol. 21, no. 4, e2022SW003285. DOI: [10.1029/2022SW003285](https://doi.org/10.1029/2022SW003285).
- Gerontidou M., Katzourakis N., Mavromichalaki H., et al. World grid of cosmic ray vertical cut-off rigidity for the last decade. *Adv. Space Res.* 2021, vol. 67, no. 7, pp. 2231–2240. DOI: [10.1016/j.asr.2021.01.011](https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.011).
- Gleeson L.J., Axford W.I. Solar modulation of galactic cosmic rays. *Astrophys. J.* 1968, vol. 154, pp. 1011–1026. DOI: [10.1086/149822](https://doi.org/10.1086/149822).
- Kato C., Kihara W., Ko Y., et al. New cosmic ray observations at Syowa station in the Antarctic for space weather study. *Journal of Space Weather and Space Climate*. 2021, vol. 11, no. 31, 12 p. DOI: [10.1051/swsc/2021005](https://doi.org/10.1051/swsc/2021005).
- Mishev A.L., Usoskin I.G. Current status and possible extension of the global neutron monitor network. *Journal of Space Weather and Space Climate*. 2020, vol. 10, no. 17, 11 p. DOI: [10.1051/swsc/2020020](https://doi.org/10.1051/swsc/2020020).
- Mishev A.L., Kocharov L.G., Usoskin I.G. Analysis of the ground level enhancement on 17 May 2012 using data from the global neutron monitor network. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014, vol. 119, no. 2, pp. 670–679. DOI: [10.1002/2013JA019253](https://doi.org/10.1002/2013JA019253).
- Mishev A., Poluianov S., Usoskin I. Assessment of spectral and angular characteristics of sub-GLE events using the global neutron monitor network. *Journal of Space Weather and Space Climate*. 2017, vol. 7, A28, 17 p. DOI: [10.1051/swsc/2017026](https://doi.org/10.1051/swsc/2017026).
- Mishev A.L., Koldobskiy S.A., Kovaltsov G.A., et al. Updated neutron-monitor yield function: Bridging between in situ and ground-based cosmic ray measurements. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2020, vol. 125, no. 2, e27433. DOI: [10.1029/2019JA027433](https://doi.org/10.1029/2019JA027433).
- Nuntiyakul W., Sáiz A., Ruffolo D., et al. Bare neutron counter and neutron monitor response to cosmic rays during a 1995 latitude survey. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018, vol. 123, no. 9, pp. 7181–7195. DOI: [10.1029/2017JA025135](https://doi.org/10.1029/2017JA025135).
- Poluianov S., Batalla O. Cosmic-ray atmospheric cutoff energies of polar neutron monitors. *Adv. Space Res.* 2022, vol. 70, no. 9, pp. 2610–2617. DOI: [10.1016/j.asr.2022.03.037](https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.03.037).
- Poluianov S.V., Usoskin I.G., Mishev A.L., et al. GLE and sub-GLE redefinition in the light of high-altitude polar neutron monitors. *Solar Phys.* 2017, vol. 292, no. 176, 7 p. DOI: [10.1007/s11207-017-1202-4](https://doi.org/10.1007/s11207-017-1202-4).
- Poluianov S., Batalla O., Mishev A., et al. Two new sub-GLEs found in data of neutron monitors at South Pole and Vostok: On 09 June 1968 and 27 February 1969. *Solar Phys.* 2024, vol. 299, no. 6, 23 p. DOI: [10.1007/s11207-023-02245-z](https://doi.org/10.1007/s11207-023-02245-z).
- Potgieter M.S. Solar modulation of cosmic rays. *Living Reviews in Solar Physics*. 2013, vol. 10, no. 10, 66 p. DOI: [10.12942/lrsp-2013-3](https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-3).
- Rao U.R., McCracken K.G., Venkatesan D. Asymptotic cones of acceptance and their use in the study of the daily variation of cosmic radiation. *J. Geophys. Res.* 1963, vol. 68, no. 2, pp. 345–369. DOI: [10.1029/JZ068i002p00345](https://doi.org/10.1029/JZ068i002p00345).
- Reames D.V. Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere. *Space Sci. Rev.* 1999, vol. 90, no. 3, pp. 413–491. DOI: [10.1023/A:1005105831781](https://doi.org/10.1023/A:1005105831781).
- Simpson J.A. The cosmic ray nucleonic component: The invention and scientific uses of the neutron monitor. *Space Sci. Rev.* 2000, vol. 93, no. 1, pp. 11–32.
- Tsyganenko N.A. A magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet. *Planetary Space Sci.* 1989, vol. 37, no. 1, pp. 5–20. DOI: [10.1016/0032-0633\(89\)90066-4](https://doi.org/10.1016/0032-0633(89)90066-4).
- URL: <https://www.mathworks.com/products/aerospace-toolbox.html> (дата обращения 10 марта 2025 г.).
- URL: <https://tools.izmiran.ru/cutoff> (дата обращения 10 марта 2025 г.).
- URL: <https://intermagnet.org/metadata/#/map> (дата обращения 10 марта 2025 г.).

Как цитировать эту статью:

Сирук С.А., Александрин С.Ю., Лагойда И.А., Майоров А.Г., Юлбарисов Р.Ф. Горные районы Российской Арктики как площадка для изучения космической погоды. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 2, с. 139–144. DOI: [10.12737/szf-112202513](https://doi.org/10.12737/szf-112202513).