

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ИОНОСФЕРЫ — АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ИНДИКАТОР СОЛНЕЧНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НИЖНЮЮ АТМОСФЕРУ

IONOSPHERIC ELECTRIC POTENTIAL AS AN ALTERNATIVE INDICATOR OF SOLAR EFFECT ON THE LOWER ATMOSPHERE

А.А. Караханян

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, asha@iszf.irk.ru*

A.A. Karakhanyan

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, asha@iszf.irk.ru*

С.И. Молодых

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, sim@iszf.irk.ru*

S.I. Molodykh

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, sim@iszf.irk.ru*

Аннотация. Изучена возможность использования электрического потенциала (ЭП) ионосферы в качестве параметра, характеризующего влияние солнечной активности на нижнюю атмосферу. ЭП рассчитывался на основе полумпирической модели, в которой пространственное распределение потенциала определяется вариациями параметров солнечного ветра, межпланетного магнитного поля, а также *AL*-индексом геомагнитной активности. Проведен сравнительный анализ ЭП и обычно используемых индексов геомагнитной активности в высокоширотной области за период с 1975 по 2019 г. Показано, что ЭП можно использовать в качестве индикатора солнечной активности, поскольку он описывает как короткопериодические возмущения, так и долговременные вариации. Обнаруженная синхронность долговременных вариаций ЭП и приповерхностной температуры позволяет предположить, что изменения параметров климатической системы связаны с более медленными изменениями крупномасштабного магнитного поля Солнца. Корреляционный анализ пространственного распределения ЭП и карт приповерхностной температуры позволил обнаружить, что условия статической устойчивости атмосферы оказывают влияние на пространственное распределение тропосферного отклика на солнечное воздействие.

Ключевые слова: электрический потенциал, солнечная активность, геомагнитный индекс, атмосфера, приповерхностная температура.

Abstract. We have explored the possibility of applying the ionospheric electric potential (EP) as a parameter describing the effects of solar activity on the troposphere. We calculated EP, using the semi-empirical model, where the potential spatial distribution is determined by solar wind, interplanetary magnetic field parameters, and the geomagnetic activity index *AL*. We have carried out a comparative analysis of EP and the commonly used geomagnetic activity indices in a high-latitude region for 1975–2019. It has been shown that EP can be used as an indicator of solar activity since it describes both short-period disturbances and long-term variations. The revealed similar trends in long-term EP variations and near-surface temperature suggest that the changes in climate system parameters are induced by slower changes in the Sun's large-scale magnetic field. The performed analysis of EP and near-surface temperature correlation maps has revealed that the atmospheric static stability conditions have an effect on spatial distribution of tropospheric response to solar impact.

Keywords: electric potential, solar activity, geomagnetic index, atmosphere, near-surface temperature.

ВВЕДЕНИЕ

Климатическая система подвергается влиянию процессов, происходящих на Солнце и в околоземном космическом пространстве. В настоящее время существуют различные индексы, характеризующие солнечную активность и ее воздействие на Землю. Индексы геомагнитной активности (*aa*, K_p , H_p , *AE*, *PC*, *Dst* и др.) широко используются в современных исследованиях солнечно-тропосферных связей по нескольким причинам: 1) геомагнитные индексы характеризуют то солнечное воздействие, которое достигло Земли и зарегистрировано на магнитной стан-

ции; 2) геомагнитные индексы представлены длинными рядами. Однако данные индексы характеризуют в первую очередь короткопериодические возмущения геомагнитного поля, частично учитывая изменения геомагнитного поля за временной интервал больше трех часов [Гаврилов и др., 2016]. Кроме того, глобальность геомагнитных индексов является дополнительным недостатком при исследовании солнечно-тропосферных связей, поскольку тропосферный отклик на солнечное воздействие неоднороден в пространстве.

Электромагнитное взаимодействие между компонентами системы магнитосфера–ионосфера–тропо-

сфера является одним из возможных механизмов солнечного влияния на нижнюю атмосферу [Kniveton et al., 2008; Harrison, Lockwood, 2020]. В рамках физического механизма, изучаемого в ИСЗФ СО РАН, мы предполагаем, что вариации солнечной активности через изменения параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля влияют на магнитосферную конвекцию, которая, в свою очередь, влияет на распределение разности электрического потенциала (ЭП) между ионосферой и Землей. Увеличение ЭП приводит к перестройке вертикального профиля объемного электрического заряда, который влияет на состояние водяного пара (увеличивается количество димеров и более крупных кластеров), в результате чего оптические свойства водяного пара изменяются в инфракрасной области спектра. Таким образом, усиление парниковых свойств атмосферы приведет к изменениям радиационного баланса климатической системы [Молодых и др., 2020]. Электрический потенциал ионосферы имеет важное значение в представленном выше механизме. Целью данной работы является анализ возможности использования ЭП в качестве параметра, характеризующего влияние солнечной активности на нижнюю атмосферу.

1. ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Эмпирические модели позволяют определить ЭП, обусловленный взаимодействием солнечного ветра с системой магнитосфера–ионосфера. Мы рассчитали пространственное распределение ЭП на основе полуэмпирической модели, в которой распределение потенциала определяется вариациями параметров солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и AL -индексом геомагнитной активности [Weimer, 2001]. Мы усреднили ЭП для области широт выше 60° N и провели сравнительный анализ ЭП и обычно используемых индексов геомагнитной активности. Данные о межпланетной среде и геомагнитные индексы с часовым разрешением за период с 1975 по 2019 г. получены из базы данных OMNI [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html]. Следует отметить новый индекс геомагнитной активности H_{po} [Yamazaki et al., 2022]. H_{po} является открытым индексом (is an open-ended index), в отличие от индекса K_p , который ограничен значением 9. Распределение частот H_{po} в высокочастотной части спектра похоже на распределение K_p , следовательно, H_{po} можно использовать в качестве альтернативы K_p с более высоким временным разрешением: 30-минутный (H_{p30}) и 60-минутный (H_{p60}) индексы [<https://www.gfz-potsdam.de/en/hpo-index>].

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

2.1. Короткопериодические вариации ЭП

Магнитные бури являются результатом постоянного воздействия вариаций солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на магнитосферу Земли. Традиционно геомагнитные бури разделяют на бури с внезапным и постепенным началом. Согласно [Обридко и др., 2013], различие магнитных бурь определяется разными источниками на Солнце: бури с внезапным началом вызываются корональ-

ными выбросами массы, бури с постепенным началом вызываются высокоскоростными потоками солнечного ветра, истекающими из корональных дыр. Поэтому мы провели анализ связи вариаций ЭП с геомагнитными индексами по указанным типам магнитных бурь в течение 21–24-го циклов солнечной активности (см. таблицу). Информация о геомагнитных бурях получена из каталога магнитных бурь, представленного на сайте ИЗМИРАНа [<https://www.izmiran.ru/magnetism/magobs/MagneticStormCatalog.html>].

В качестве примера на рис. 1 показаны вариации ЭП и геомагнитных индексов для геомагнитных бурь с внезапным (20 ноября 2003 г.) и постепенным (13 июля 1982 г.) началом. Анализ отдельных геомагнитных возмущений показал, что вариации ЭП хорошо коррелируют с геомагнитными индексами во время магнитных бурь с внезапным началом. Ослабление корреляции между вариациями ЭП и геомагнитными индексами наблюдается во время магнитных бурь с постепенным началом, возможно, потому, что вариации солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и, следовательно, ЭП отражают и спорадические процессы на Солнце, и изменения крупномасштабных солнечных магнитных полей. Таким образом, ЭП описывает короткопериодические возмущения, связанные как с корональными выбросами массы, так и с высокоскоростными потоками солнечного ветра из корональных дыр, в отличие от геомагнитных индексов, которые отражают степень возмущенности магнитного поля Земли.

2.2. Долговременные вариации ЭП

Климатические условия последних десятилетий характеризуются увеличением скорости приповерхностного потепления, особенно в Арктическом и Субарктическом регионах. Для оценки будущих климатических изменений необходимо адекватно моделировать процессы в различных слоях атмосферы, включая верхние слои и учитывая их взаимодействие с процессами в нижних слоях атмосферы [Мохов, 2020]. Разработка алгоритма параметрического воздействия солнечной активности на тропосферу требует определения оптимальной характеристики солнечного влияния на нижнюю атмосферу.

О характере долговременных изменений ЭП и индексов геомагнитной активности можно судить по рис. 2, на котором приведены вариации ЭП и геомагнитных индексов K_p , PC за период с 1975 по 2019 г. Тенденция повышения ЭП наблюдается три последних солнечных цикла. Противоположная тенденция характерна для геомагнитных индексов. Обнаруженная асинхронность рассматриваемых характеристик, возможно, связана с особенностями развития циклов солнечной активности (22–24), которые свидетельствуют об изменении режима генерации магнитных полей в зоне солнечной конвекции [Ishkov, 2010]. В качестве характеристики климатической системы приведена средняя годовая температура на уровне сигма 0.995 гПа из реанализа NCEP/NCAR [Kalnay et al., 1996; <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>], усредненная для области широт выше 60° N.

Коэффициенты корреляции между вариациями ЭП и геомагнитными индексами во время геомагнитных бурь. Интенсивность магнитных бурь — 4

Дата	$R_{EP/Dst}$	$R_{EP/Hp60(Kp)}$	$R_{EP/AE}$	$R_{EP/PC}$
Геомагнитные бури с внезапным началом				
11.04.1981	-0.32 ± 0.07	0.28 ± 0.07	0.27 ± 0.07	0.54 ± 0.05
06.04.2000	-0.30 ± 0.07	$0.52(0.51) \pm 0.06$	0.53 ± 0.06	0.81 ± 0.03
20.11.2003	-0.74 ± 0.03	$0.67(0.68) \pm 0.04$	0.59 ± 0.05	0.70 ± 0.04
07.11.2004	-0.41 ± 0.06	$0.48(0.47) \pm 0.06$	0.38 ± 0.07	0.58 ± 0.05
17.03.2015	-0.55 ± 0.05	$0.46(0.45) \pm 0.06$	0.46 ± 0.06	0.60 ± 0.05
Геомагнитные бури с постепенным началом				
13.07.1982	-0.08 ± 0.08	-0.01 ± 0.08	0.15 ± 0.08	0.03 ± 0.08
07.04.1995	-0.21 ± 0.07	$0.27(0.23) \pm 0.07$	0.31 ± 0.07	0.40 ± 0.06
15.07.2000	-0.05 ± 0.08	$0.30(0.24) \pm 0.07$	0.43 ± 0.06	0.32 ± 0.07
24.08.2005	0.17 ± 0.07	$0.05(0.01) \pm 0.08$	0.08 ± 0.08	0.01 ± 0.08

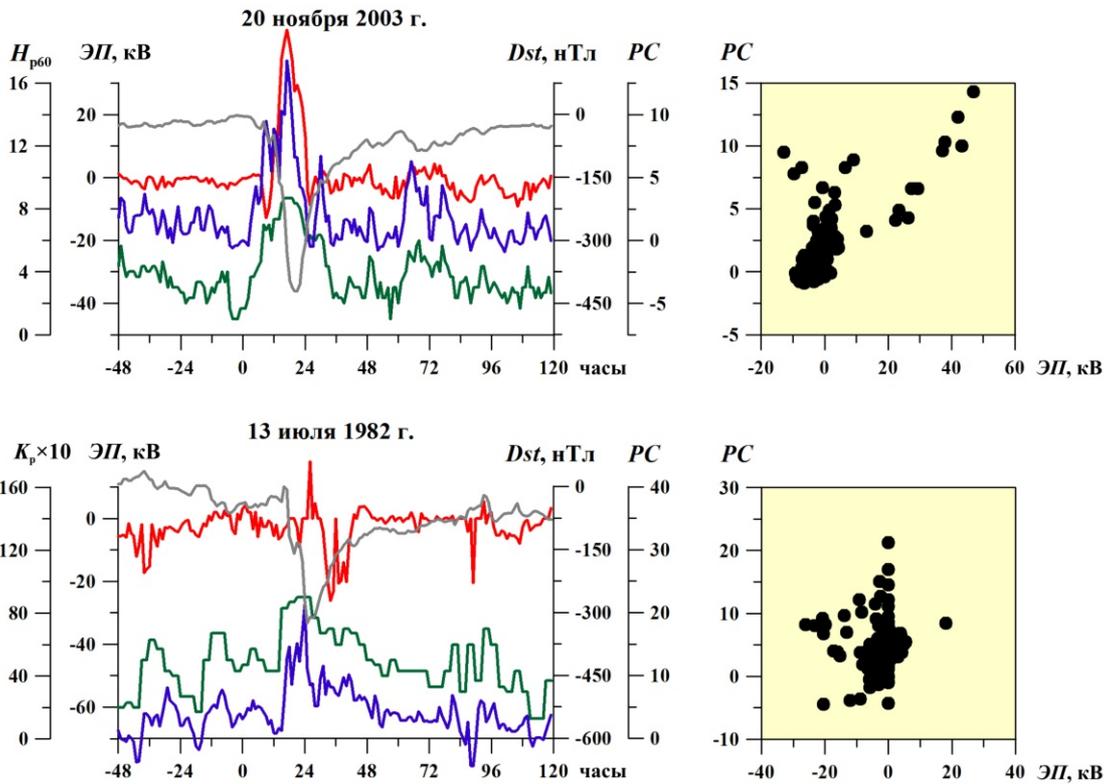


Рис. 1. Вариации ЭП (красная линия) и геомагнитных индексов за 7-дневный интервал во время сильных геомагнитных бурь: серая линия — Dst ; зеленая линия — H_{p60} ; $K_p \times 10$; синяя линия — PC . Ноль по горизонтальной оси — начало геомагнитной бури (слева), диаграммы рассеяния часовых значений ЭП и PC -индекса (справа)

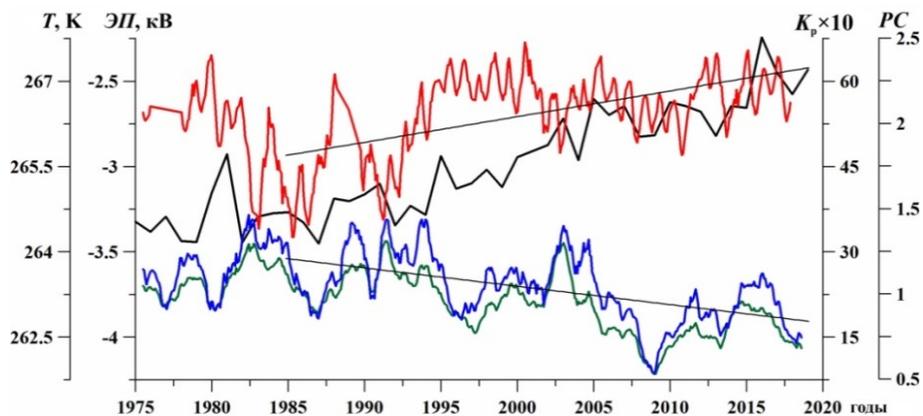


Рис. 2. Средние месячные значения ЭП (красная линия) и геомагнитных индексов: $K_p \times 10$ (зеленая линия); PC (синяя линия), сглаженные по 12 точкам, и средняя годовая приповерхностная температура (черная линия) за период с 1975 по 2019 г.

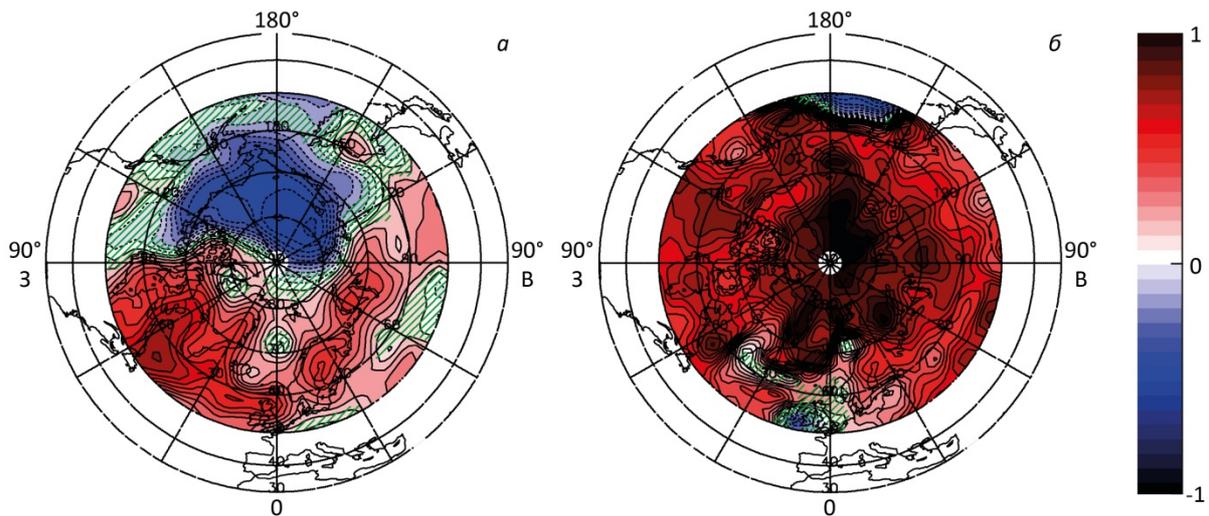


Рис. 3. Пространственное распределение: *a* — коэффициентов корреляции между ЭП и приповерхностной температурой; *б* — параметра $d\gamma/dT \times 10$; области, в которых их значения ниже стандартного отклонения, заштрихованы зеленым

Сравнительный анализ рис. 2 показывает тенденцию синхронного изменения ЭП и приповерхностной температуры. Следовательно, можно предположить, что крупномасштабное магнитное поле Солнца в большей степени, чем мелкомасштабное, оказывает влияние на долговременные изменения температуры.

2.3. Пространственное распределение ЭП

Известно, что тропосферный отклик на солнечное воздействие имеет неоднородную пространственно-временную структуру [Веретенко, Огурцов, 2012]. Поэтому мы предполагаем, что наличие пространственного распределения ЭП — характеристики солнечного воздействия — позволит получить однозначный тропосферный отклик. Благодаря тому, что используемая в работе модель ЭП позволяет рассчитать его пространственное распределение, мы построили карты коэффициентов корреляции между вариациями ЭП и изменениями приповерхностной температуры за период с 1975 по 2019 г. (рис. 3, *a*). Как и ожидалось, между ними преобладает положительная связь, т. е. получен однозначный температурный отклик на солнечное воздействие в пространстве. Различия, которые наблюдаются в секторе Арктики (область отрицательных коэффициентов корреляции), возможно, обусловлены особенностями состояния тропосферы в регионе. Вертикальная температурная стратификация атмосферы характеризует статическую устойчивость тропосферы, с изменениями которой связаны условия возникновения и развития конвекции, облакообразование и вихревая активность. Пространственное распределение чувствительности вертикального градиента температуры γ к вариациям приповерхностной температуры представлено на рис. 3, *б*. Параметр $d\gamma/dT$, характеризующий чувствительность γ к приповерхностной температуре, рассчитывался по среднегодовым данным за период с 1975 по 2019 г. Полученная положительная корреляция γ с приповерхностной температурой указывает на положительную климатическую обратную связь в межгодовой изменчивости.

Отмеченная особенность согласуется с результатами работы [Акперов и др., 2019], которые свидетельствуют об общем уменьшении статической устойчивости тропосферы арктических широт Северного полушария при глобальном потеплении. Наибольшее увеличение чувствительности γ к вариациям приповерхностной температуры наблюдается в Арктическом регионе, в котором отмечена отрицательная корреляция между вариациями ЭП и изменениями приповерхностной температуры.

ВЫВОДЫ

Анализ возможности применения электрического потенциала (ЭП) ионосферы в качестве характеристики солнечного воздействия на нижнюю атмосферу позволил сделать следующие выводы:

1. ЭП можно использовать в качестве индикатора солнечной активности, поскольку ЭП описывает как короткопериодические возмущения с характерным временем менее трех часов, так и долговременные вариации.
2. Обнаруженная синхронность долговременных вариаций ЭП и приповерхностной температуры подтверждает, что изменения параметров климатической системы могут быть связаны с более медленными изменениями крупномасштабного магнитного поля Солнца.
3. На основе рассчитанных карт корреляции между ЭП и приповерхностной температурой можно предположить, что на пространственное распределение тропосферного отклика на солнечное воздействие оказывают влияние естественные условия атмосферы, связанные с изменениями вертикальной температурной стратификации в тропосфере.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акперов М.Г., Мохов И.И., Дембицкая М.А. и др. Особенности температурной стратификации в тропосфере

арктических широт по данным реанализа и модельных расчетов. *Метеорология и гидрология*. 2019. № 2. С. 19–27.

Веретенко С.В., Огурцов М.Г. Исследование пространственно-временной структуры долгопериодных эффектов солнечной активности и вариаций космических лучей в циркуляции нижней атмосферы. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2012. Т. 52, № 5. С. 626–638.

Гаврилов Б.Г., Ряховский И.А., Маркович И.Э. и др. О применимости планетарных и станционных индексов геомагнитной активности. *Гелиогеофизические исследования*. 2016. № 15. С. 42–48.

Молодых С.И., Жеребцов Г.А., Караханян А.А. Оценка влияния солнечной активности на уходящий поток инфракрасного излучения. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2020. Т. 60, № 2. С. 208–215. DOI: [10.31857/S0016794020020108](https://doi.org/10.31857/S0016794020020108).

Мохов И.И. Российские климатические исследования в 2015–2018 гг. *Изв. РАН. Физ. атм. и океана*. 2020. Т. 56, № 4. С. 376–396. DOI: [10.31857/S0002351520040069](https://doi.org/10.31857/S0002351520040069).

Обридко В.Н., Канониди Х.Д., Митрофанова Т.А., Шельтинг Б.Д. Солнечная активность и геомагнитные возмущения. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2013. Т. 53, № 2. С. 157–166. DOI: [10.7868/S0016794013010148](https://doi.org/10.7868/S0016794013010148).

Harrison R.G., Lockwood M. Rapid indirect solar responses observed in the lower atmosphere. *Proc. Roy. Soc. A*. 2020. Vol. 476, iss. 2241, 20200164. DOI: [10.1098/rspa.2020.0164](https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0164).

Ishkov V.N. Properties and surprises of solar activity XXIII cycle. *Sun and Geosphere*. 2010. Vol. 5, no. 2. P. 43–46.

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996. Vol. 77, iss. 3. P. 437–470.

Kniveton D.R., Tinsley B.A., Burns G.B., Bering E.A., Troshichev O.A. Variations in global cloud cover and the fair-weather vertical electric field. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008. Vol. 70, iss. 13. P. 1633–1642. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.07.001](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.07.001).

Weimer D.R. An improved model of ionospheric electric potentials including substorm perturbations and application to the Geospace Environment Modeling November 24, 1996, event. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2001. Vol. 106, iss. A1. P. 407–416. DOI: [10.1029/2000JA000604](https://doi.org/10.1029/2000JA000604).

Yamazaki Y., Matzka J., Stolle C., et al. Geomagnetic activity index Hpo. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, iss. 10, e2022GL098860. DOI: [10.1029/2022GL098860](https://doi.org/10.1029/2022GL098860).

URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html (дата обращения 1 марта 2023 г.).

URL: <https://www.gfz-potsdam.de/en/hpo-index> (дата обращения 1 марта 2023 г.).

URL: <https://www.esrl.noaa.gov/psd> (дата обращения 1 марта 2023 г.).

URL: <https://www.izmiran.ru/magnetism/magobs/MagneticStormCatalog.html> (дата обращения 1 марта 2023 г.).

Статья подготовлена по материалам Восемнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 6–10 февраля 2023 г., ИКИ РАН, Москва, Russia.

Как цитировать эту статью:

Караханян А.А., Молодых С.И. Электрический потенциал ионосферы — альтернативный индикатор солнечного воздействия на нижнюю атмосферу. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 2. С. 111–115. DOI: [10.12737/szf-92202313](https://doi.org/10.12737/szf-92202313).