

Научная статья

УДК 378.016:811

DOI 10.17150/2411-6262.2021.12(4).9

**В.И. Дегтярев**

*Институт Солнечно-Земной Физики СО РАН,  
г. Иркутск, Российская Федерация*

**Г.В. Попов**

*Байкальский государственный университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация*

**С.Э. Чудненко**

*Институт Солнечно-Земной Физики СО РАН,  
г. Иркутск, Российская Федерация*

## ПОСТУПЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В МАГНИТОСФЕРУ И ЕЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ

**АННОТАЦИЯ.** Рассмотрено поступление энергии из солнечного ветра в магнитосферу и ее диссипация в кольцевом токе и авроральной ионосфере во время максимумов интенсивности магнитных бурь. Все магнитные бури с интенсивностью Dst от  $-18$  нТл до  $-422$  нТл за период 1996–2014 гг были разбиты на группы. Для каждой из групп методом наложенных эпох определены средний вклад энергии из солнечного ветра в магнитосферу и последующие характеристики диссипации этой энергии в авроральной ионосфере и кольцевом токе. Выявлена нелинейность зависимости интенсивности магнитных бурь от энергии, поступающей из солнечного ветра в магнитосферу. Обнаружено аномальное поведение магнитных бурь с интенсивностью  $|Dst| > 200$  нТл. Приводится обсуждение результатов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА.** Солнечный ветер, магнитные бури, межпланетное магнитное поле, кольцевой ток, авроральная ионосфера.

**ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ.** Дата поступления 2 ноября 2021 г.; дата принятия к печати 23 ноября 2021 г.; дата онлайн-размещения 30 декабря 2021 г.

Original article

**V.I. Degtyarev**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russian Federation*

**G.V. Popov**

*Baikal State University,  
Irkutsk, Russian Federation*

**S.E. Chudnenko**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russian Federation*

## ENERGY INFLOW INTO THE MAGNETOSPHERE AND ITS DISTRIBUTION DURING MAGNETIC STORMS

**ABSTRACT.** The energy inflow from the solar wind into the magnetosphere and its dissipation in the circular current and auroral ionosphere during maximums of magnetic storm intensity are considered. All magnetic storms with Dst intensities from  $-18$  nT to  $-422$  nT for the period from 1996 to 2014 were divided into groups. For each group, the mean contribution of energy from the solar wind to the magnetosphere and subsequent characteristics of the energy dissipation in the auroral

© Дегтярев В.И., Попов Г.В., Чудненко С.Э., 2021

**Baikal Research Journal**

электронный научный журнал Байкальского государственного университета

ionosphere and circular current were determined by the superposed epoch analysis method. The nonlinearity of the dependence of the intensity of magnetic storms on the energy coming from the solar wind into the magnetosphere was revealed. Anomalous behavior of magnetic storms with intensity  $|\text{Dst}| > 200$  nT was detected. A discussion of the results is given.

**KEYWORDS.** Solar wind, magnetic storms, interplanetary magnetic field, circular current, auroral ionosphere.

**ARTICLE INFO.** Received November 2, 2021; accepted November 23, 2021; available online December 30, 2021.

## Введение

Как известно, при взаимодействии солнечного ветра (СВ) с магнитосферой Земли (МФЗ) часть его кинетической энергии попадает внутрь магнитосферы. Исследование передачи энергии из солнечного ветра в магнитосферу, ее преобразования и рассеяния (диссипации) в системе связи СВ-МФЗ-ионосфера является фундаментальной проблемой в солнечно-земной физике. Детальному описанию механизма инжекции энергии из СВ и ее преобразованию внутри МФЗ посвящена обширная литература. Ярким проявлением взаимодействия потоков солнечного ветра с магнитосферой Земли являются магнитосферные бури (МБ). Последствием очень сильных магнитных бурь может оказаться нарушения в работе электрических сетей, сбой в работе радиоэлектронной аппаратуры, выход из строя искусственных спутников Земли. Доказано также негативное влияние магнитных бурь на самочувствие человека.

В опубликованных работах рассмотрены как отдельные случаи энергетике МБ в магнитосфере [1; 2], так и статистические результаты исследования энергетического бюджета магнитосферы в периоды магнитных бурь за определенные периоды [3]. В [3] была рассмотрена связь между полной энергией вклада энергии солнечного ветра в магнитосферу и интенсивностью магнитных бурь для периодов главной фазы и фазы восстановления бури.

В настоящей работе на основе более обширного материала мы рассмотрим особенности связи интенсивности МБ, мощности кольцевого тока и энергии, поступающей в полярную ионосферу, с вкладом энергии из СВ. В отличие от [3] будет использована также более современная оценка энергии, поступающей из СВ в МФ.

### 1. Поступление кинетической энергии солнечного ветра в магнитосферу

Прямое измерение энергии СВ, попадающей в магнитосферу и реализуемой в магнитосферных процессах в настоящее время недоступно, однако возможна косвенная ее оценка на основе следующих рассуждений.

Энергия солнечного ветра, поступающая в магнитосферу, преобразуется в электрические токи, протекающие в различных областях магнитосферы и ионосферы. В свою очередь эти токи создают возмущения геомагнитного поля, которые регистрируются на уровне Земли в виде индексов геомагнитной активности. Таким образом, на основе связи основных параметров солнечного ветра с геомагнитными индексами можно оценить энергию СВ, инжектируемую в магнитосферу.

В литературе приводятся различные формулы для оценки количества энергии СВ, попадающей в магнитосферу. Наиболее часто используют формулу, приведенную в [4], однако в ней присутствует константа  $l_0$  (длина хвоста магнитосферы), которая вносит значительную неопределенность в результат расчета.

В дальнейшем в этих формулах был предложен ряд модернизаций, основанных на поиске наилучшей связи между параметрами СВ и индексами геомагнит-

ных возмущений, регистрируемых на поверхности Земли. Одно из последних выражений для энергии  $E_{in}$ , поступающей из СВ в магнитосферу, было предложено авторами [5]:

$$E_{in} = 3.78 \cdot 10^7 \cdot n_{sw}^{0.24} \cdot V_{sw}^{1.47} \cdot B_T^{0.86} \cdot [\sin^{2.70}(\theta/2) + 0.25], \text{ (Вт)} \quad (1)$$

где  $\theta$  есть часовой угол межпланетного магнитного поля (ММП):

$$\begin{aligned} \theta &= \arctg(|B_Y/B_Z|) \text{ при } B_Z > 0 \\ \theta &= 180^\circ - \arctg(|B_Y/B_Z|) \text{ при } B_Z < 0; \end{aligned}$$

$B_Y, B_Z$  — компоненты ММП,  $B_T = (B_X^2 + B_Y^2)^{1/2}$ ;  $V_{sw}$  — скорость СВ,  $n_{sw}$  — плотность СВ.

Авторы [5] показали, что коэффициенты корреляции между  $E_{in}$  (1) и наиболее популярными индексами геомагнитной активности составляют 0,53–0,74, что выше, чем для соответствующих оценок по работе [4], где они принимали значения 0,33–0,59. Это выражение (1) и будет использоваться в настоящей работе.

В нашем исследовании использованы данные по 474 магнитным бурям с интенсивностями от –19 нТл до –422 нТл за период 1996–2014 гг., охватывающий 3 цикла солнечной активности. В отличие от работы [3] для выявления деталей эмпирических зависимостей и уменьшения ошибки аппроксимации мы рассматривали не каждую бурю в отдельности, а группы бурь с близкой интенсивностью. Для расчетов были использованы часовые данные Dst индекса с сайта МЦД в Киото [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>], а данные СВ и ММП взяты с сайта [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>].

На рис. 1 показана зависимость интенсивности магнитной бури (МБ) от энергии, поступающей в магнитосферу из СВ в час максимума интенсивности бури. Здесь весь массив МБ был разбит на группы с близкими интенсивностями: 7 групп по 30 случаев МБ (диапазон –Dst: 18–57 нТл), 7 групп по 20 МБ (диапазон –Dst: 58–85 нТл), 11 групп по 10 МБ (диапазон –Dst: 86–207 нТл) и 2 группы по 4 МБ (диапазон –Dst: 214–301 нТл). Для каждой группы МБ определялись средние значения  $E_{in}$  и средние интенсивности бурь в минимуме Dst. Результаты расчетов для отдельных супербурь с интенсивностями: 1. –387 нТл (31.03.2001); 2. –353 нТл (30.10.2003); 3. –422 нТл (20.11.2003) и 4. –374 нТл (08.11.2004) также представлены на рисунке (обозначены звездочками с соответствующими номерами бурь).

Зависимость интенсивности МБ от энергии, вносимой в магнитосферу из солнечного ветра можно аппроксимировать следующим образом (точки заключенные в овал не были включены в расчет):

$$|Dst| = 1,03 \cdot 10^2 \{ \lg(E_{in}) - 7,1 \}, \text{ нТл}$$

где  $E_{in}$  в единицах  $10^{13}$  Вт. Для подавляющего большинства МБ их интенсивность нелинейно зависит от энергии, поступающей в магнитосферу. Коэффициент корреляции между  $E_{in}$  и интенсивностью МБ довольно высокий ( $R = 0.976$ ). Из рис. 1 также следует, что для супербурь с  $Dst < -300$  нТл, существует дополнительный источник энергии, кроме энергии СВ, подпитывающий кольцевой ток.

#### Энергетика магнитосферы.

Энергия СВ, попадающая в МФ, преобразуется в энергию магнитосферного возмущения в основном в трех областях магнитосферы: в полярной ионосфере, в области кольцевого тока (КТ) и в области хвоста магнитосферы:

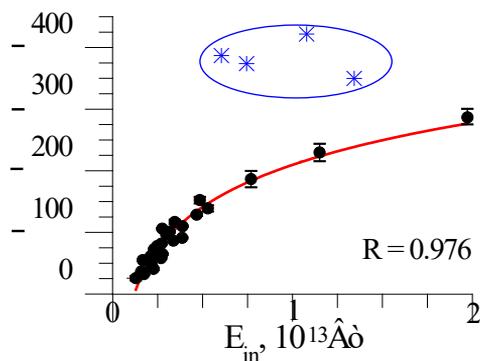


Рис. 1. Связь между энергией, поступающей из СВ в магнитосферу, и интенсивностью МБ в час минимума  $Dst$  (подробности в тексте)

$$U_T = U_r + U_{AJ} + U_{tail},$$

где  $U_r$  — мощность КТ,  $U_{AJ} = U_J + U_A$  — мощность, выделяемая в полярной ионосфере, связанная с джоулевой диссипацией ( $U_J$ ) и энерговыделением вторгающимся в авроральную ионосферу авроральных частиц ( $U_A$ ),  $U_{tail}$  — энергия, которая переносится в хвост.

#### Диссипация энергии в кольцевом токе (КТ).

Скорость инжекции энергии в КТ (см. работу [6] и ссылки в ней):

$$U_r(t) = 7.4 \cdot \left( \frac{dDst^*}{dt} + \frac{Dst^*}{\tau} \right), \text{ GW} \quad (2)$$

где  $Dst^*$  — индекс  $Dst$ , исправленный по [6] на динамическое давление СВ (в нТл),  $\tau$  — время распада кольцевого тока (в часах), зависящее от интенсивности МБ ( $|Dst^*|$ ). Мы будем оценивать инжекцию энергии в КТ, используя модель  $\tau$ , предложенную в [7].

На рис. 2 показана связь энергии КТ с энергией СВ, вносимой в магнитосферу. Поскольку энергия КТ зависит от интенсивности МБ (2), то можно было ожидать, что результаты расчета для четырех супербурь, обозначенных на рисунке звездочками в овале, также, как на рис. 1, будут отличаться от общей тенденции зависимости  $U_r(E_{in})$ .

#### Энергетический вклад в авроральную ионосферу.

Полная энергия, реализуемая в полярной ионосфере:

$$U_{AJ} = U_A + U_J.$$

Для оценки реализации энергии СВ в полярной ионосфере используют индексы возмущенности геомагнитного поля по измерениям в авроральной зоне (АЕ-или АЛ-индексы). Существует множество оценок  $U_A$  и  $U_J$ , которые между собой отличаются на порядок величины и более [8; 9].

Авторы [8] исследуя связь энергии, поступающей от высыпавшихся электронов с энергиями 0.1-100 кэВ, и геомагнитными индексами АЕ и АЛ, установили,

$$U_A = 0,11AE + 21,8GW \quad (3)$$

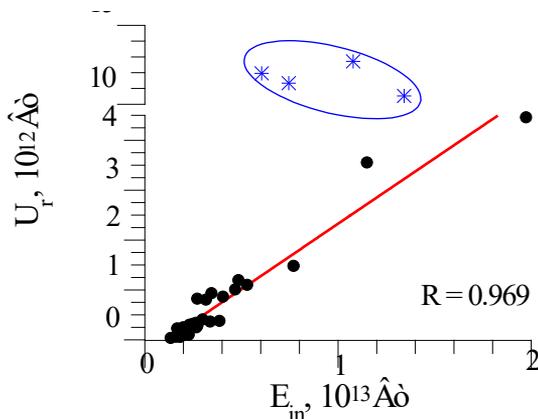


Рис. 2. Связь между энергией  $E_{in}$ , поступающей в магнитосферу из солнечного ветра и среднечасовой энергией КТ в период главной фазы МБ

с коэффициентом корреляции  $R = 0,76$ . Сопоставление с другими авторами показывает, что это лучшее представление энергии, выделяющейся в полярной ионосфере за счет выпадающих частиц.

В [9] приводится более десятка эмпирических выражений (различных авторов для различных условий) энергии реализуемой в авроральной ионосфере за счет авроральных токов. Мы воспользуемся эмпирической связью, полученной в [10; 11], которая дает примерно средние значения для вычисленных  $U_j$  по другим, приведенным в [9], формулам:

$$U_j = 0,32AE \quad (4)$$

Эти формулы (3–4) мы и будем использовать для исследования тенденции связи между поступающей в МФ энергией СВ и диссипацией ее в полярной ионосфере.

На рис. 3 показана зависимость энергии, вносимой в авроральную ионосферу в максимуме интенсивности бури  $|Dst|$ , от поступления энергии из СВ. Здесь более явно видны граничные условия для полного вклада СВ в ионосферу.

Отметим довольно большой разброс точек относительно линии регрессии. Однако коэффициент корреляции высокий  $R = 0,860$ . Точки на рис. 3, выделенные овалом, не вошли в расчет основной зависимости  $U_{Adj} = U_{Adj}(E_{in})$ . Как видно из рис. 3, в овал объединены не только результаты отдельных супербури (как на рис. 1, 2), но и попали две группы бурь (по 4 случая в каждой) со средними интенсивностями  $-230$  нТл и  $-287$  нТл.

### Обсуждение и выводы

Мы получили два основных результата, которые отличаются от ранее полученных результатов других исследователей [3; 12].

Все проанализированные магнитные бури (МБ) можно разделить на две группы в зависимости от связи их интенсивности с энергией, поступающей из СВ в магнитосферу:

Группа 1 — это МБ, интенсивность которых нелинейно растет с увеличением количества энергии, вносимой из СВ, (для интенсивности МБ с Dst от  $-30$  до  $-300$  нТл);

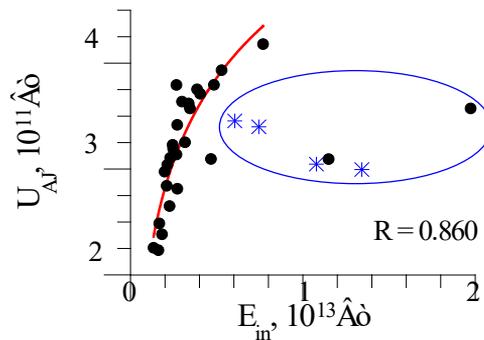


Рис. 3. Связь энерговыделения в авроральной ионосфере с энергией, внедряемую в магнитосферу из СВ в час максимума  $|Dst|$  магнитной бури для бурь 1996–2014

Группа 2 — это супербури с интенсивностями  $Dst < -300$  нТл, интенсивность которых не зависит от количественного вклада энергии из СВ.

Нелинейная зависимость интенсивности магнитных бурь от вклада энергии в магнитосферу связана, по-видимому, с действием на магнитосферу динамического давления солнечного ветра. Предельное сжатие магнитосферы, вследствие этого динамического давления, наступает при определенной критической возмущенности ( $Dst \approx -300$  нТл) [13]. Эта величина граничной интенсивности магнитной бури по [13] хорошо совпадает и с нашим результатом. Критическая величина интенсивности МБ между наблюдаемой основной тенденцией зависимости интенсивности МБ от  $E_{in}$  и отличной от нее зависимости для группы супербурь в нашем случае составляет  $Dst \approx -301$ ч  $-353$  нТл. Набор статистики для бурь с интенсивностью менее  $-300$  нТл может в дальнейшем сузить этот граничный интервал.

Следствием сжатия магнитосферы при усилении динамического давления СВ является также смещение границ авроральной зоны и, соответственно, системы авроральных токов, к экватору. При смещении аврорального электроджета к экватору сеть наземных высокоширотных магнитных обсерваторий выходит из области наиболее интенсивных токов, что резко понижает АЕ индекс и вместе с ним расчетные величины энергоснабжения высокоширотной ионосферы.

Появление группы супербурь с интенсивностью менее  $-300$  нТл может быть следствием того, что, помимо непосредственного источника энергии из СВ, в этих случаях появляется дополнительный источник энергии для кольцевого тока. Таким источником энергии может быть энергия, предварительно запасенная в хвосте магнитосферы (в виде магнитной энергии) и реализуемая в кольцевом токе. «Спусковым крючком» процесса взрывного освобождения энергии хвоста в кинетическую энергию магнитосферной плазмы и диссипацией в высокоширотной магнитосфере могут быть изменения характеристик межпланетного магнитного поля, солнечного ветра и магнитосферы [14]. Сценарий, когда предварительно запасенная энергия магнитного поля в хвосте магнитосферы компенсирует энергетический вклад СВ наиболее четко проявляется при слабой солнечной активности в период спада цикла [15].

#### Список использованной литературы

1. Энергетика магнитосферной супербури 20 ноября 2003 г. / Ю.А. Караваев, Л.А. Сапронова, А.Д. Базаржапов [и др.] // Солнечно-земная физика. — 2006. — № 9 (122). — С. 34–40.

2. Solar Winds Control of Magnetospheric Energetic during Magnetic Storms / A. Levitin, Y. Feldstein, L. Dremukhina [et al.] // Physics of Auroral Phenomena : Proceedings XXVIII Annual Seminar. — Apatity, 2005. — P. 37–43.
3. Characteristics of magnetospheric energetics during geomagnetic storms / H. Li, C. Wang, W.Y. Xu, J.R. Kan. — DOI 10.1029/2012JA017584 // Journal of Geophysical Research. — 2012. — Vol. 117, iss. A4. — P. 1–9.
4. Perreault P. A study of geomagnetic storm / P. Perreault, S.I. Akasofu. — DOI 10.1111/J.1365-246X.1978.TB05494.X // Geophysical Journal International. — 1978. — Vol. 54, iss. 3. — P. 547–573.
5. Solar wind-magnetosphere energy coupling function fitting: Results from a global MHD simulation / C. Wang, J.P. Han, H. Li [et al.]. — DOI 10.1002/2014JA019834 // Journal of Geophysical Research. — 2014. — Vol. 119, iss. 8. — P. 6199–6212.
6. Prigancova A. Magnetospheric storm time dynamic in terms of energy output rate / A. Prigancova, Y.A. Feldstein. — DOI 10.1016/0032-0633(92)90272-P // Planetary and Space Science. — 1992. — Vol. 40, iss. 4. — P. 581–588.
7. Gonzalez W.D. Ring current evolution during intense magnetic storms/ W.D. Gonzalez // Paper presented at Magnetic Storm/substorm Relationship Workshop, June, Natl. Geophys. Data Cent. — Breckenridge, 1993. — P. 24–27.
8. Energy analysis of substorms based on remote sensing techniques, solar wind measurements, and geomagnetic indices / N. Illstgaard, G. Germany, J. Stadnes, R.R. Vondrac. — DOI 10.1029/2001JA002002 // Journal of Geophysical Research. — 2002. — Vol. 107, iss. A9. — P. SMP 9-1–SMP 9-14.
9. A relation between the energy deposition by electron precipitation and geomagnetic indices during substorms / N. Illstgaard, R.R. Vondrak, J.W. Gjerloev, G. Germany. — DOI 10.1029/2001JA002003 // Journal of Geophysical Research. — 2002. — Vol. 107, iss. A9. — P. SMP 16-1–SMP 16-7.
10. Baumjohann W. Hemispherical Joule heating and the AE indices / W. Baumjohann, Y. Kamide. — DOI 10.1029/JA089IA01P00383 // Journal of Geophysical Research. — 1984. — Vol. 89, iss. A1. — P. 383–388.
11. Spiro R.W. Precipitating electron energy flux and auroral zone conductance — An empirical model / R.W. Spiro, P.H. Reiff, L. J. Maher Jr. — DOI 10.1029/JA087IA10P08215 // Journal of Geophysical Research. — 1982. — Vol. 87, iss. A10. — P. 8215–8227.
12. Energy balance during intense and super-intense magnetic storms using an Akasofu e parameter corrected by the solar wind dynamic pressure / A. de Lucas, W.D. Gonzalez, E. Echer [et al.]. — DOI 10.1016/J.JASTP.2007.09.001 // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2007. — Vol. 69, iss. 15. — P. 1851–1863.
13. Хорошева О.В. Магнитосферные возмущения и связанная с ними динамика ионосферных электроструй, полярных сияний и плазмопаузы / О.В. Хорошева // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1987. — Т. 27, № 5. — С. 804–811.
14. Крымский П.Ф. Два вида реакции магнитосферы на изменения параметров солнечного ветра / П.Ф. Крымский, Ю.Ф. Ромащенко, Ю.Н. Романов // Наблюдения искусственных небесных тел. — 1988. — Т. 84, № 2. — С. 228–231.
15. Xu W.Y. Energy budget of the magnetosphere-ionosphere system in solar Cycle 23 / W.Y. Xu, A.M. Du. — DOI 10.1007/s11431-012-4809-6 // Science China Technological Sciences. — 2012. — Vol. 55, iss. 5. — P. 1184–1188.

### Информация об авторах

*Дегтярев Виталий Иванович* — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт солнечно-земной физики, Сибирское отделение Российской академии наук, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: degt@iszf.irk.ru, SPIN-код: 9705-3372, AuthorID РИНЦ: 59521.

*Попов Георгий Васильевич* — доктор физико-математических наук, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: popov2898@mail.ru, SPIN-код: 3979-6755, AuthorID РИНЦ: 58756.

*Чудненко Светлана Эдуардовна* — инженер-программист, Институт солнечно-земной физики, Сибирское отделение Российской академии наук, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: [chud@iszf.irk.ru](mailto:chud@iszf.irk.ru), AuthorID РИНЦ: 62388.

### Authors

*Vitalii I. Degtyarev* — PhD in in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: [degt@iszf.irk.ru](mailto:degt@iszf.irk.ru). SPIN-Code: 9705-3372, AuthorID RSCI: 59521.

*George V. Popov* — D.Sc. in Physics and Mathematics, Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: [popov2898@mail.ru](mailto:popov2898@mail.ru). SPIN-Code: 3979-6755, AuthorID RSCI: 58756.

*Svetlana E. Chudnenko* — Software Engineer, Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: [chud@iszf.irk.ru](mailto:chud@iszf.irk.ru), AuthorID RSCI: 62388.

### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Contribution of the Authors

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

### Для цитирования

Дегтярев В.И. Поступление энергии в магнитосферу и ее распределение во время магнитных бурь / В.И. Дегтярев, Г.В. Попов, С.Э. Чудненко — DOI 10.17150/2411-6262.2021.12(4).9 // *Baikal Research Journal*. — 2021. — Т. 12, № 4.

### For Citation

Degtyarev V.I., Popov G.V., Chudnenko S.E. Energy Inflow into the Magnetosphere and Its Distribution During Magnetic Storm. *Baikal Research Journal*, 2021, vol. 12, no. 4. (In Russian). DOI: 10.17150/2411-6262.2021.12(4).9.