




**А. Б. Андреев** , **В. И. Капытин** , **О. И. Соколова\***   
*Институт ионосферы, Казахстан, г. Алматы,*  
*e-mail: [olgsokolova@yandex.kz](mailto:olgsokolova@yandex.kz)*

## **МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ, ПРИВОДЯЩИХ К ПОЯВЛЕНИЮ ГЕОМАГНИТНО ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА**

**Аннотация.** Определены морфологические особенности гелиогеофизических условий, приводящих к появлению геомагнитно индуцированных токов на средних широтах. на примере очень большой геомагнитной бури с внезапным началом, произошедшей 10-15 мая 2021 г., дано описание морфологических особенностей гелиогеофизических условий, приводящих к появлению геомагнитно индуцированных токов на средних широтах. Для описания этого гелиогеофизического события использованы спутниковые данные наблюдений с высоким временным разрешением (5 минут) за различными параметрами солнечного ветра, данные о межпланетных и геомагнитных индексах. Геомагнитно индуцированные токи могут быть введены в сеть и вызвать множество неблагоприятных для человека последствий. Уязвимость основных электроэнергетических систем к таким событиям возросла за последние несколько десятилетий, поскольку линии электропередачи энергосистемы стали более взаимосвязанными и увеличились в длине. В данной работе определены морфологические особенности гелио-геофизических условий, приводящих к появлению геомагнитно индуцированных токов на средних широтах. Так, на примере очень большой геомагнитной бури с внезапным началом, произошедшей 10-15 мая 2021 г., дано описание морфологических особенностей гелио-геофизических условий, приводящих к появлению геомагнитно индуцированных токов на средних широтах.

**Ключевые слова:** геомагнитно индуцированный ток, геомагнитная буря, солнечная вспышка.

**А. Б. Андреев, В. И. Капытин, О. И. Соколова**

*Ионосфера институты, Қазақстан, Алматы қ.*  
*e-mail: [olgsokolova@yandex.kz](mailto:olgsokolova@yandex.kz)*

## **Қазақстан аумағында геомагниттік индукцияланған токтардың пайда болуына әкелетін гелиогеофизикалық жағдайлардың морфологиялық ерекшеліктері**

**Аннотация.** Орта ендіктерде геомагниттік индукцияланған токтардың пайда болуына әкелетін гелио-геофизикалық жағдайлардың морфологиялық ерекшеліктері анықталды. 2021 жылдың 10-15 мамырында кенеттен басталған өте үлкен геомагниттік дауылдың мысалында орта ендіктерде геомагниттік индукцияланған токтардың пайда болуына әкелетін гелио-геофизикалық жағдайлардың морфологиялық ерекшеліктері сипатталған. Бұл гелиогеофизикалық оқиғаны сипаттау үшін Күн желінің әртүрлі параметрлерін, планетааралық және геомагниттік индекстер туралы деректерді жоғары уақыттық ажыратымдылықтағы (5 минут) спутниктік бақылау деректері пайдаланылды. Геомагниттік индукцияланған токтарды желіге енгізуге және көптеген жағымсыз салдарға әкелуі мүмкін. Соңғы бірнеше онжылдықта негізгі электр энергетикалық жүйелерінің осындай оқиғаларға осалдығы артты, өйткені электр желісінің электр желілері өзара байланысты болып, ұзындығы ұлғайды. Бұл жұмыста ортаңғы ендіктерде геомагниттік индукцияланған токтардың пайда болуына әкелетін гелио-геофизикалық жағдайлардың морфологиялық ерекшеліктері анықталған. Осылайша, 2021 жылғы 10-15 мамырда кенеттен басталған өте үлкен геомагниттік дауылдың мысалын пайдалана отырып, геомагниттік индукцияланған ағындардың ортасында геомагниттік индукциялық ағындардың пайда болуына әкелетін гелиогеофизикалық жағдайлардың морфологиялық ерекшеліктеріне сипаттама беріледі ендіктер. Бұл жұмыстың мақсаты Қазақстан аумағында геомагниттік индукциялық ағындардың пайда болуына әкелетін гелиогеофизикалық жағдайлардың морфологиялық ерекшеліктерін талдау болып табылады.

**Түйінді сөздер:** геомагниттік индукцияланған ток, геомагниттік дауыл, күн сәулесі.

**A.B. Andreyev, V.I. Kaputin, O.I. Sokolova**

## **Morphological features of heliogeophysical conditions leading to the appearance of geomagnetically induced currents on the territory of Kazakhstan**

**Abstract.** Morphological features of helio-geophysical conditions leading to the appearance of geomagnetically induced currents at mid-latitudes are determined. Using the example of a very large geomagnetic storm with a sudden onset that occurred on May 10-15, 2021, the morphological features of the helio-geophysical conditions leading to the appearance of geomagnetically induced currents at mid-latitudes are described. To describe this heliogeophysical event, satellite observations with high time resolution (5 minutes) for various parameters of the solar wind, data on interplanetary and geomagnetic indices were used. Geomagnetically induced currents can be introduced into the network and cause many adverse consequences. The vulnerability of major electric power systems to such events has increased over the past few decades as the transmission lines of the power grid have become more interconnected and increased in length. In this paper, the morphological features of the helio-geophysical conditions leading to the appearance of geomagnetically induced currents at middle latitudes are determined. Thus, using the example of a very large geomagnetic storm with a sudden onset that occurred on May 10-15, 2021, a description is given of the morphological features of the helio-geophysical conditions leading to the appearance of geomagnetically induced currents at mid-latitudes.

**Keywords:** Geomagnetically Induced Current, Geomagnetic Storm, Solar Flare.

### **Введение**

Возмущения околоземного космического пространства, генерируемые Солнцем, корональные выбросы массы (СМЕ) и ударные волны солнечного происхождения в результате сложного взаимодействия солнечного ветра с магнитным полем Земли приводят к геокосмическим бурям. Интенсивные бури вызывают не только нарушения радиосвязи, но и сбои в работе линий электропередач, систем навигации [1]. Экстремальные солнечные события, такие как вспышки, сопровождающиеся выбросом мощного магнитного облака, вызывают возмущение магнитного поля Земли и формируют флуктуирующие токи в ионосфере и магнитосфере. Одним из негативных последствий экстремальных солнечных явлений для технологических систем является появление геомагнитно индуцированных токов в проводящих наземных системах, линиях электропередачи и трубопроводах. Итак, гелио-геоэффективные процессы являются причиной для беспокойства из-за ущерба, который они наносят высоковольтным электросетям.

Геомагнитно индуцированные токи (ГИТ) могут быть введены в сеть и вызвать множество неблагоприятных последствий. Уязвимость основных электроэнергетических систем к таким

событиям возросла за последние несколько десятилетий, поскольку линии электропередачи энергосистемы стали более взаимосвязанными и увеличились в длине. Потоки реальной и реактивной мощности, колебания напряжения, сдвиги частоты, нежелательные операции реле, гармонические токи более высокого порядка – все это возможные последствия негативного влияния «космической погоды» [2-9]. Очень большие магнитные бури (ОБМБ) и большие магнитные бури (БМБ) могут привести к массовым отключениям и колоссальному повреждению любой высоковольтной электросети, если не будут использованы надлежащие методы мониторинга и смягчения последствий.

Целью настоящей работы является анализ морфологические особенности гелиогеофизических условий, приводящих к появлению геомагнитно индуцированных токов на территории Казахстана.

Многие страны мира уже имеют надежные способы прогнозирования появления геомагнитно-индуцированных токов в электроэнергетической системе, но Казахстану, который имеет протяженные линии электропередач и трубопроводов, необходима собственная стратегия смягчения последствий геомагнитно индуцированных токов, учитывающая

ионосферные токи, проводимость почвы и пространственное направление основные линии. С другой стороны, результаты исследования влияния внешних факторов на изменчивость геомагнитного поля как открытой неравновесной системы, несомненно, представляют большой интерес для решения многих научных задач в области физики околоземного космического пространства и самой Земли.

#### Данные и методология

В данной работе проведен комплексный анализ гелиогеофизических данных, полученных по измерениям орбитальных спутников и наземных обсерваторий. Используются спутниковые данные наблюдений с высоким временным разрешением (5 минут) за различными параметрами солнечного ветра, данные о межпланетных и геомагнитных индексах, предоставленные OMNIWeb, NASA ([omniweb.gsfc.nasa.gov](http://omniweb.gsfc.nasa.gov)) и индекс  $K_p$ , предоставленный WDC, Kyoto ([wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp)), а также анализировались данные единственной в среднеазиатском регионе геомагнитной обсерватории «Алма-Ата» (IAGA код AAA) [43.25°N; 76.92°E], входящей в сеть INTERMAGNET. В обсерватории (AAA) измерения проводятся в реальном времени

с помощью специализированного измерительного комплекса. Комплекс состоит из двух цифровых магнитовариационных станций на базе феррозондовых магнитометров (LEMI-008 и LEMI-018) и вариационной станции с протонным магнитометром (POS-1), а также феррозондовым деклинометром Lemi-203 на базе теодолита ЗТ2КП. В обсерватории (AAA) проводят наблюдения геомагнитного поля с 1963 г. таких параметров как геомагнитное склонение  $D$ , горизонтальная составляющая  $H$ , полный вектор напряженности геомагнитного поля  $F$ , северная составляющая  $X$ , восточная составляющая  $Y$ , вертикальная составляющая  $Z$ .

#### Анализ геомагнитных бурь в Казахском регионе за период 2010-2020 годы

Рассматриваемый временной интервал 01.01.2010-31.05.2021 охватывает разные уровни солнечной активности: низкий (2010 г. и 2017-2021 гг.), когда поток радиоизлучения Солнца  $F10.7 < 100$ ; средний (2011-2013 гг.; 2016 г.),  $F10.7 = 100 \div 150$ ; и высокий (2014-2015 гг.),  $F10.7 > 150$ , рисунок 1.

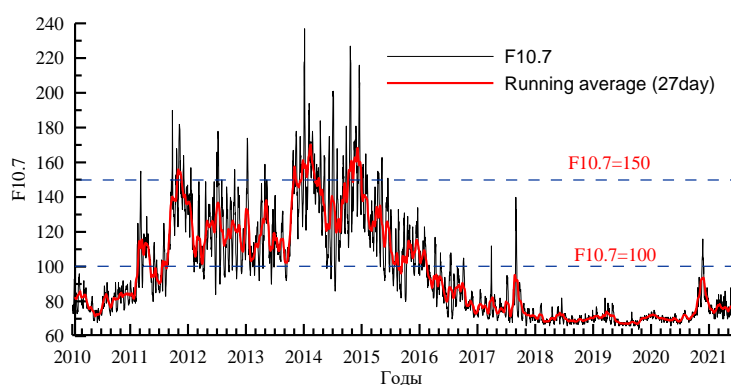


Рисунок 1 – Вариации потока радиоизлучения Солнца  $F10.7$  за 2010-2020 годы

Негативные электромагнитные эффекты на магистральные линии электропередач и нефтегазотрубопроводы на территории Казахстана оказывают, в первую очередь, очень большие

геомагнитные бури (ОБМБ) и большие магнитные бури (БМБ). Геомагнитной обсерваторией Алма-Ата за 01.01.2010-30.05.2020 гг. зарегистрировано 78 событий: 14 ОБМБ ( $K \geq 7$ ;  $H \geq 211$  нТл), из

них 11 событий с внезапным началом Sc, и 64 БМБ ( $K=6$ ;  $160\text{нТл} \geq H \leq 210\text{нТл}$ ), из них 17 событий с внезапным началом Sc. В настоящей работе мы не рассматриваем умеренные ( $K=4\div 5$ ;  $111\text{нТл} \geq H \leq 160\text{нТл}$ ) и малые бури ( $K=3$ ;  $70\text{нТл} \geq H \leq 110\text{нТл}$ ).

Распределение выбранных 78 событий по годам показано на рисунке 2 (а) и по месяцам рисунок 2(б). В годы высокой и средней солнечной активности (СА) количество событий БМБ и ОБМБ в 2,5-4 раза выше чем в годы низкой СА, рисунок 2(а). Распределение событий по месяцам показывает, что БМБ и ОБМБ чаще всего происходят во время весеннего и осеннего равноденствия, в 2,2 и 2,7 раз

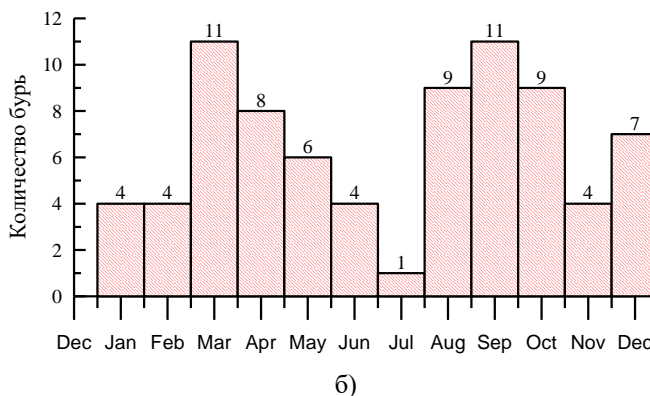
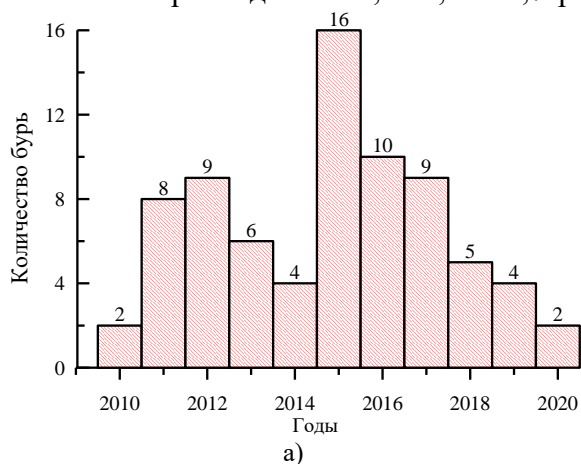


Рисунок 2 – Распределение бурь (БМБ и ОБМБ) по годам (а) и по месяцам (б)

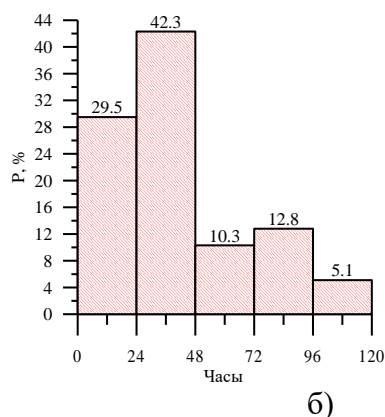
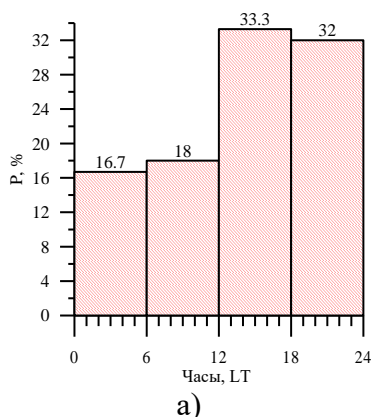


Рисунок 3 – Распределение бурь (БМБ и ОБМБ) в течение суток (а) и по длительности события (б)

выше, чем в зимние и летние месяцы, рисунок 2(б).

Распределение времени начала БМБ и ОБМБ в течение суток показывает, что с 12 LT до 24 LT вероятность события в 2 раза выше, чем с 00 LT до 12 LT, рисунок 3(а).

По длительности события распределяются следующим образом (рисунок 3(б):

- длительность от 0 до 24 часов – 29,5 %;
- длительность от 24 до 48 часов – 42,3 %;
- длительность от 48 до 72 часов – 10,3 %;
- длительность от 72 до 96 часов – 12,8 %;
- длительность от 96 до 120 часов – 5,1 %.

На примере очень большой геомагнитной бури с внезапным началом, произошедшей 12-13 мая 2021 г., опишем особенности гелиогеофизических условий, приводящих к появлению геомагнитно индуцированных токов на средних широтах. Влияние геомагнитной бури 12 мая 2021 года на точность географического позиционирования описано в работе [10]. Для описания этого гелиогеофизического события мы использовали спутниковые данные наблюдений с высоким временным разрешением (5 минут) за различными параметрами солнечного ветра, данные о межпланетных и геомагнитных индексах, предоставленные OMNIWeb, NASA ([omniweb.gsfc.nasa.gov](http://omniweb.gsfc.nasa.gov)) и индекс  $K_p$ , предоставленный WDC, Kyoto ([wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp)).

На разных панелях рисунке 4 показаны вариации гелиогеофизических параметров с 10 по 15 мая 2021 года:

*вариации солнечных индексов:*

- давления солнечного ветра,  $P$ , нПа, рисунок 4(a);

- скорости солнечного ветра,  $SW$ , км/с, рисунок 4(b);

*вариации межпланетных индексов:*

-  $B_z$  компоненты межпланетного магнитного поля, IMF  $B_z$ , нТл, рисунок 4(c);

-  $E_y$  компоненты межпланетного электрического поля, IEF  $E_y$ , мВ/м, рисунок 4(d);

*изменения межпланетного индекса  $K_p$ , рисунок 4 (e).*

Период с 10 мая 2021 года с 00:00 UT по 12 мая 2021 года с 17:00 UT считается спокойным, когда значения межпланетной среды изменялись следующим образом:

давление солнечного ветра меняется на  $P = (2,2 \pm 0,5)$  нПа;

скорость солнечного ветра изменяется  $SW = (348,7 \pm 0,5)$  км/с;

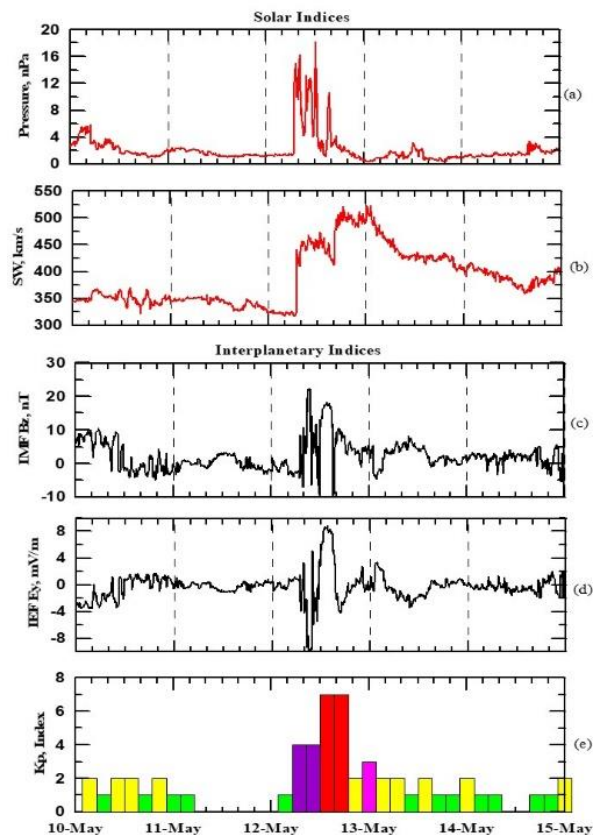
компонента межпланетного магнитного поля  $B_z = (1,8 \pm 0,5)$  нТл;

компонента межпланетного электрического пол  $E_y = (-0,52 \pm 0,1)$  МВ/м.

Межпланетный индекс  $K_p$  имеет значение от 0 до 2 в спокойных условиях.

Изменения гелиогеофизических параметров в возмущенный период приведены ниже в таблице.

Год, месяц, день, время, UT	Параметр	1-ый max/min	Время, UT	2-ой max
2021.05.12 08:15	$P$ , (нПа)	16,3	12:00	18,1
2021.05.12 08:10	$SW$ , (км/с)	457,4	18:20	521
2021.05.12 07:50	$B_z$ , нТл	10,7	09:15	22,3
2021.05.12 09:20	$E_y$ , мВ/м	-9,9	13:30	8,8



Временные изменения: давления (a); скорости солнечного ветра (b); IMF  $B_z$  (c); IEF  $E_y$  (d);  $K_p$  index (e)

Рисунок 4 – Вариации солнечных, межпланетных и геомагнитных индексов во время очень большой геомагнитной бури 10-15 мая 2021г.

**Радиационная обстановка в период с 10 по 15 мая 2021 года в околоземном космическом пространстве**

Активные процессы, происходящие на Солнце, например, вспышки, выбросы корональных масс, могут сопровождаться ускорением солнечных энергичных частиц, или, как их еще называют,

солнечных космических лучей (СКЛ). При определенных условиях потоки этих частиц резко возрастают. Происходит солнечное протонное событие, это наиболее важное и опасное явление, приводящее к усилению радиационного фона в околоземном космическом пространстве [11-12]. Особый класс протонных событий составляют так называемые наземные возрастания (Ground Level Enhancement - GLE). С их помощью определяется максимальная энергия протонов СКЛ. Солнечные электроны высоких энергий могут вызвать объемную ионизацию космических аппаратов, а также могут выбить из строя электронные микросхемы, установленные на космических аппаратах. Из-за потоков СКЛ нарушается коротковолновая связь в приполярных районах и возникают сбои в навигационных системах. Комплексная система спутникового и наземного мониторинга радиационной обстановки позволяет давать оценку радиационного воздействия космической среды на околоземное пространство, на технику, на человеческую деятельность.

В периоды геомагнитных бурь происходят корпускулярные высыпания, в основном электронов, а также протонов, из радиационных поясов Земли. Высыпания энергичных заряженных частиц из магнитосферы и радиационных поясов могут составлять часть продольных токов, но основной вклад извержений в ГИТ осуществляется по следующей схеме. Частицы энергий порядка килоэлектронвольт, попадающие в ионосферу, создают дополнительную ионизацию на высотах 90-120 км от Земли и повышают проводимость в зонах выпадения осадков, что, согласно закону Ома, приводит к увеличению горизонтальных ионосферных токов и создаваемых ими магнитных полей. Изменения в этих полях с течением времени (наиболее интенсивные во время магнитных бурь и суббурь), согласно закону Фарадея, вызывают ГИТ в трубопроводах и электрических системах [13-14]. Авторы отмечают, что вклад в

ГИТ электронных осадков из радиационных поясов является наибольшим по сравнению с другими источниками магнитосферно-ионосферно-литосферной природы. Таким образом, воздействие корпускул, выплескивающихся из радиационных поясов и из геомагнитосферы во время мощных геомагнитных бурь, создает дополнительные системы тока в ионосфере, которые генерируют колебания поверхности Земли через электрические поля. Значение ГИТ больше в меридионально расположенных трубопроводах и линиях электропередачи, поскольку в этом случае колебания магнитных полей на концах являются наибольшими, а это означает, что электродвижущая сила, вызывающая такие токи, также достигает максимальных значений. Такие токи постоянно рассматриваются как угроза работоспособности крупных энергосистем, включая ускорение коррозии магистральных трубопроводов [13-14]. Для анализа радиационной обстановки в зависимости от диапазона энергии электронов и протонов мы воспользовались сайтом «Online plotting system for SOHO/EPHIN level 2 intensities»: <http://www2.physik.uni-kiel.de/SOHO/phpeph/EPHIN.htm>.

На рисунке 5 представлены 5-минутные вариации скорости  $v_p$  и плотности  $\rho_p$  потока протонов в период с 10 по 15 мая 2021 г., измеренные на космической обсерватории SOHO. Следует отметить средневозмущенный период, который приходится на 10.05.2021, значения скорости потока протонов равны  $v_p = (338,2 \pm 24,50)$  км/с и средняя плотность потока протонов  $\rho_p = (8,28 \pm 5,00)$  см<sup>-3</sup>. В этот период на околоземную орбиту пришли энергичные частицы от выброса корональной массы Солнца 9 мая 2021 г.

Спокойный период в данных наблюдается с 00:00UT 11.05.2021 по 05:00UT 12.05.2021 средние значения скорости потока протонов равны  $v_p =$

$(311,0 \pm 0,20)$  км/с и средняя плотность потока протонов  $\rho_p = (3,27 \pm 1,0)$  см<sup>-3</sup>.

Затем наблюдается резкий рост и в 09:00 UT 12.05.2021 значения скорости потока протонов достигают значения  $v_p = 439,0$  км/с и значения плотности потока протонов  $\rho_p = 35,5$  см<sup>-3</sup>. Максимальное значение плотности потока протонов  $\rho_p = 45,66$  см<sup>-3</sup> достигается 12 мая 2021 в 07:28 UT.

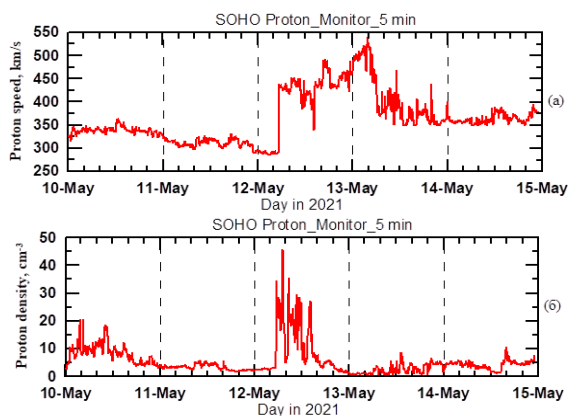


Рисунок 5 – Вариации скорости  $v_p$  и плотности  $\rho_p$  потока протонов в период с 10 по 15 мая 2021 г.

### Заключение

Определены морфологические особенности гелио-геофизических условий, приводящих к появлению геомагнитно индуцированных токов на средних широтах. на примере очень большой геомагнитной бури с внезапным началом, произошедшей 10-15 мая 2021 г., дано описание морфологических особенностей гелио-геофизических условий, приводящих к появлению геомагнитно индуцированных токов на средних широтах. Для описания этого гелиогеофизического события

использованы спутниковые данные наблюдений с высоким временным разрешением (5 минут) за различными параметрами солнечного ветра, данные о межпланетных и геомагнитных индексах, предоставленные OMNIWeb, NASA (omniweb.gsfc.nasa.gov) и индекс  $Kp$ , предоставленный WDC, Kyoto (wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp). Итак, гелио-геоэффективные процессы являются причиной для беспокойства из-за ущерба, который они наносят высоковольтным электросетям.

Геомагнитно индуцированные токи могут быть введены в сеть и вызвать множество неблагоприятных последствий. Уязвимость основных электроэнергетических систем к таким событиям возросла за последние несколько десятилетий, поскольку линии электропередачи энергосистемы стали более взаимосвязанными и увеличились в длине. Потоки реальной и реактивной мощности, колебания напряжения, сдвиги частоты, нежелательные операции реле, гармонические токи более высокого порядка – все это возможные последствия большого геомагнитного возмущения. ОБМБ и БМБ может привести к массовым отключениям и колоссальному повреждению любой высоковольтной электросети, если не будут использованы надлежащие методы мониторинга и смягчения последствий.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP09259554)».

### Список литературы

- 1 Мирошниченко Л.И. Физика Солнца и солнечно-земных связей: учебное пособие // под ред. М. И. Панасюка. - М.: Университетская книга, 2011. -174 с.
- 2 Gannon J. L., Swidinsky A., Xu Zh. Geomagnetically Induced Currents from the Sun to the Power Grid //Geophysical Monograph Series: John Wiley & Sons, ISBN: 978-1-119-43438-2, 2019. -P.246-256.  
<https://doi.org/10.1002/9781119434412.ch2> (дата обращения 2021-05-05)
- 3 David T.O. Oyedokun, Pierre J.Cilliers Classical and Recent Aspects of Power System Optimization: Chapter 16 - Geomagnetically Induced Currents: A Threat to Modern Power Systems.– Academic Press, 2018, P. 421-462.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812441-3.00016-1>. (дата обращения 2021-05-05)
- 4 Bailey R. L., Halbedl T. S., Schattauer I., Römer Al. , Achleitner G., Beggan C. D. , Wesztergom V., Egli R., Leonhardt R. Modelling geomagnetically induced currents in midlatitude Central Europe using a thin-sheet approach // Ann. Geophys. - 2017. -Vol. 35. -P. 751-761. DOI: [org/10.5194/angeo-35-751-2017](https://doi.org/10.5194/angeo-35-751-2017).
- 5 Pirjola R. Review on the calculation of the surface electric and magnetic fields and geomagnetically induced currents in ground based technological systems // Surv. Geophys. - 2002. -Vol. 23. -P. 71-90. DOI:10.1023/A:1014816009303.
- 6 Ngwira C. M., Pulkkinen A., McKinnell L.-A., Cilliers P. J. Improved modeling of geomagnetically induced currents in the South African power network, Space Weather. - 2008. -Vol. 6. -P. S11004. DOI:10.1029/2008SW000408.
- 7 Barbosa C., Alves L., Caraballo R., Hartmann G. A., Papa A.R., Pirjola R.J. Analysis of geomagnetically induced currents at a low-latitude region over the solar cycles 23 and 24: comparison between measurements and calculations // J. Space Weather Space Clim. -2015. - Vol. 5. -P. A35. DOI: 10.1051/swsc/2015036
- 8 Barbosa C.S., Ferreira D.S., do Espírito Santo M.A., Papa A.R. Statistical analysis of geomagnetic field reversals and their consequences // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. -2013. - Vol. 392. - P. 6554-6560. DOI: 10.1016/j.physa.2013.08.025.
- 9 Gaunt C.T., Coetzee G. Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC-risk, in: Proceedings, Power Tech, 2007 IEEE, Lausanne, P. 807-812. DOI: 10.1109/PCT.2007.4538419.
- 10 Valdés-Abreu, J.C.; Díaz, M.A.; Báez, J.C.; Stable-Sánchez, Y. Effects of the 12 May 2021 Geomagnetic Storm on Georeferencing Precision. Remote Sens. 2022, 14, 38.  
<https://doi.org/10.3390/rs14010038>
- 11 Muraki Y. et al. Solar Neutron Decay Protons observed in November 7, 2004 // Proceedings of Science/ Online ICRC, 2021. <https://pos.sissa.it/395/1264/pdf>
- 12 Kataoka, R., Sato, T., Miyake, S., Shiota, D., & Kubo, Y. (). Radiation dose nowcast for the ground level enhancement on 10–11 September 2017. // Space Weather. – 2018. –Vol. 16.–P. 917–923. <https://doi.org/10.1029/2018SW001874>
- 13 Gannon, J. L., Swidinsky, A., Xu Zh., 2019. Geomagnetically Induced Currents from the Sun to the Power Grid., pp. 246-256.  
<https://doi.org/10.1002/9781119434412.ch2>.
- 14 Avakian, S.V., Namgaladze, A.A., 2012. Some technospheric manifestations of heliogeophysical disturbances. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 82, 1. 43–49.

**Принято в печать 11.04.2022**



