

Қ.Е. Нұрғалиева

Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Қазақстан, Алматы қ.

e-mail: kuralay.nurgalyeva@kaznu.edu.kz

ҒАРЫШ РАЙЫНЫҢ ОРТА ЕНДІКТЕ ГЕОМАГНИТТІ ИНДУКЦИЯЛАНҒАН ТОКТЫҢ ПАЙДА БОЛУЫНА ӘСЕР ЕТУІН ЗЕРТТЕУ

Соңғы онжылдықта геофизикалық мәселелер арасында геомагниттік индукциялық токтар негізіндегі физикалық процестерді зерттеу - іргелі зерттеулер мәселелерінің негізгілерінің бірі болып тұр. Геомагнитті индукцияланған токты қатерлі "соққы" аспектісі ретінде қарау бастапқыда NASA-ның "Жұлдызбен өмір сүру" жобасында орын алды және осы жұмыс тобының негізгі нәтижелерінің бірі геомагниттік индукцияланған токтың мәселерінің ғылыммен техниканы ұштастыра отырып шешу керектігін көрсеткенінде болды. Ұсынылып отырған жұмыста есептеулер бірқабатты модель арқылы жүзеге асырылды, ол модель іргелі заңдарына негізделген. Бұл жұмыста 2016 – 2021 жылдар аралығында орта ендікте "Алма-ата" магниттік обсерватория мәліметтеріне жүгіне отырып магниттік дауылдар зерттелінді. Қарастырылған геофизикалық жағдайлар үшін геоиндукцияланған токтар мәні анықталып, токтардың орта ендікте индукциялану ерекшеліктері зерттелді.

2016 – 2021 жылдар аралығында геомагниттік жағдайды зерттеліп, 25 жағдай бөлініп алынды. Ол жағдайлар ішінде: 1 күшті дауыл, 1 орташа дауыл, 5 субдауыл, және 18 қарапайым магниттік дауыл болды. Осы жағдайдар үшін индукцияланған ток мәндері бағаланды. Индукцияланған ток мәні, күшті магниттік дауыл кезінде $I=0,4$ мА құрады. Орташа магниттік дауыл кезінде $I=0,14$ мА құрады. Басталуы күрт дауыл кезінде $I=0,75$ мА құрады. Қарапайым магниттік дауыл (0,06 – 0,15) мА болды. Жалпы дауыл қарқындылығының өсуіне қарай индукцияланған ток мәні де өседі. Алайда, ерекшелік те бар. Мысалы, басталуы күрт дауыл кезінде дауыл кр – индексіне қарап бағалағанда әлсіз дауылдар қатарына жатқанымен, индукцияланған ток мәні үлкен болып шықты. Субдауыл кезінде 0,07 – 0,13 мА ток индукцияланған.

Түйін сөздер: Ғарыш райы, магниттік дауыл, геомагнитті индукцияланған ток.

K.E. Nurgaliyeva

Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

e-mail: kuralay.nurgalyeva@kaznu.edu.kz

Investigation of the influence of space weather on the occurrence of geoinduction currents in the middle latitudes

The study of physical processes based on geomagnetic induction currents among the geophysical problems of the last decade is one of the main problems of fundamental research. Consideration of geomagnetic-induced current as a threatening "shock" aspect originally took place in the NASA project "life with a star", and one of the main results of this working group was that the problems of geomagnetic-induced current must be solved in combination with science and methods. In the proposed work, calculations were carried out using a model of the same type, the model of which is based on the fundamental laws.

The retrospective analysis of the geophysical situation for 2016-2021 was carried out on the basis of the data of the Alma-Ata geomagnetic observatory. For all the considered events, the GIC values were calculated and the peculiarities of the occurrence of GIC at middle latitudes were studied. Of all the events studied for 2016-2021, 25 events were identified. Among these events: 1 large geomagnetic storm, 1 medium geomagnetic storm, 5 substorms and 18 weak geomagnetic storms. For these events, the following was identified. During a large geomagnetic storm, the GIC amplitude value was $I=0.4$ mA. During an average magnetic storm $I=0.14$ mA. During a storm with a sudden onset induced current amplitude $I=0.75$ mA. During weak magnetic storms, the amplitude values varied within (0.06 - 0.15) mA. In general, it can be seen, that the GIC amplitude values depend on the intensity of the geomagnetic storm. However, there are some exceptions.

For example, a storm with a sudden onset according to the planetary index refers to weak geomagnetic storms, however, the GIC value turned out to be greater than the GIC induced during a large geomagnetic storm. At the same time, we also considered substorms. During substorms, currents of the order of 0.07-0.13mA were induced.

Key words: Space weather, magnetic storm, geomagnetically induced current.

К.Е. Нурғалиева

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, Алматы
e-mail: kuralay.nurgalyeva@kaznu.edu.kz

Исследование влияния космической погоды на возникновение геоиндукционных токов в средних широтах

Исследование физических процессов на основе геомагнитных индукционных токов среди геофизических проблем последнего десятилетия является одной из основных проблем фундаментальных исследований. Рассмотрение геомагнитно-индуцированного тока как угрожающего "ударного" аспекта первоначально имело место в проекте НАСА "жизнь со звездой", и один из основных результатов этой рабочей группы заключался в том, что проблемы геомагнитно-индуцированного тока необходимо решать в сочетании с наукой и методами. В предлагаемой работе расчеты осуществлялись с помощью однотипной модели, модель которой основана на фундаментальных законах. Проведен ретроспективный анализ геофизической обстановки за 2016 – 2021 годы на базе данных геомагнитной обсерватории "Алма-Ата". Для всех рассмотренных событий были рассчитаны значения ГИТ и исследованы особенности возникновения ГИТ в средних широтах.

Из всех исследованных событий за 2016-2021 годы были выделены 25 событий. Среди этих событий: 1 большая геомагнитная буря, 1 средняя геомагнитная буря, 5 суббурь и 18 слабых геомагнитных бурь. Для этих событий было выявлено следующее. Во время большой геомагнитной бури амплитудное значение ГИТ составило $I=0,4$ мА. Во время средней магнитной бури $I=0,14$ мА. Во время бури со внезапным началом $I=0,75$ мА. Во время слабых магнитных бурь амплитудные значения варьировались в рамках (0,06 – 0,15)мА. В целом можно заметить что амплитудные значения ГИТ зависят от интенсивности геомагнитной бури. Однако есть некоторые исключения. Например буря с внезапным началом по планетарному индексу относится к слабым геомагнитным бурям, однако значение ГИТ оказалось больше, чем ГИТ индуцированные во время большой геомагнитной бури. Вместе с тем нами также были рассмотрены суббури. Во время суббурь индуцировались токи порядка 0,07 – 0,13 мА.

Ключевые слова: Космическая погода, магнитная буря, геомагнитный индуцированный ток.

Кіріспе

Мақалада келтірілген нәтижелер геомагниттік ұйытқулар кезінде электр желілерінде пайда болатын индукциялық тоқты есептеу алгоритмі мен әдістемесіне негізделген. 2016 – 2021 жылдар аралығында орта ендікте "Алма-ата" магниттік обсерватория мәліметтеріне жүгіне отырып, бірқабатты модель арқылы түрлі геомагнитті жағдайда туындайтын геоиндукцияланған токтардың (ГИТ) мәндеріне бағам беріліп отыр.

Бұл жұмыста алынған нәтижелердің өзектілігі мен құндылығы Қазақстанның электр энергетикалық жүйелеріне геомагнитті индукцияланған токтардың әсерін бағалаудың әзірленген критерийлері магистральдық электр беру желілерінің қауіпсіз жұмыс істеуінің

техносфералық қауіпсіздігі мәселелерін шешу және оларды пайдалану кезінде ғарыштық факторларды есепке алу үшін қажеттілігімен анықталады.

Зерттеу материалдары мен әдістері

Алдыңғы бөлімде аталып өткендей, электр энергетикалық жүйесіне төнген қауіп-қатерді бағалау үшін алдымен ГИТ тоқты индукциялаған геомагниттік өрісінің ұйытқуын зерттеуіміз қажет. [21-23] мақалаларының авторлары геомагнит өрісінің кеңістік-уақыттық сипаттамаларының негізінде геомагниттік ұйытқу байқалғандағы ғарыш райы оқиғаларының ерекшеліктерін көрсетіп және олардың қай кезде кең ауқымды сипатқа ие болатынын көрсеткен.

Геомагниттік вариациялардан басқа, геоэлектрлік өзгерістер де бар. Жалпы алыс аралықтарға тартылған тұйықталған электр желілерінде геоэлектрлік өрісі токтарды тудырады. Яғни ГИТ-ті есептеу үшін екі сатылы жұмыс атқару қажет: геоэлектрлік өрісті анықтаймыз, содан кейін осы геоэлектрлік өрістен туындаған ГИТ -тің мәнін анықтаймыз.

Есептеулер бірқабатты модель арқылы жүзеге асырылды, ол модель Фарадей, Ампер және Ом заңдарына негізделген:

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial T}, \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu \mathbf{j}, \\ \mathbf{j} &= \sigma \mathbf{E}, \end{aligned} \quad (1)$$

мұндағы \mathbf{E} және \mathbf{B} – сәйкесінше электр және магнит өрістерінің кернеуліктері, σ – электр өтімділігі, \mathbf{j} – ток тығыздығы. x компоненті үшін осы теңдеулерден электр өрісінің кернеулігін келесідей өрнектейміз

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 B_y}{\partial Z^2} - \mu \sigma \frac{\partial B_y}{\partial T} &= 0 \\ \frac{\partial B_y}{\partial Z} + \mu \sigma E_x &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Осы келтірілген бірөлшемді моделге (1, 2 теңдеулер) сүйене отырып 2016 – 2021 жылдары аралығында таңдалып алынған геомагниттік өріс ұйытқулары байқалған кезеңдер үшін геомагниттік ток мәні бағаланды. Есептеулер үшін «Институт ионосферы» ЕЖШС «Алма-Ата» геомагнит обсерваториясының магнитометрлері тіркеген Жер геомагнит өрісінің толық векторы мен құраушыларының мәндері алынған.

Әдебиетке шолу

«Ғарыш райы» ұғымы мен тіркесін алғашқылардың бірі болып 20 ғасырдың басында А.Л.Чижевский қолданған еді. Ол ғарыш райының биосфера мен ноосфераға әсерін зерттеудің негізін қалады [1-7]. Ғарыш райына деген зерттеушілердің қызығушылығының өсуіне ғарышта коммерциялық бағытта және әскери қауіпсіздік шараларын қамтамасыз етуге жұмыс жасайтын жүйелердің бірқалыпты жұмыс жасау мәселелері бірден бір себепші болды деуге де болады [8-10]. Зерттеулер көрсеткендей ғарыш райына Күн райы, яғни күн желі және күн желінің плазмасы арқылы тасымалданатын планета аралық магнит өрісі әсер етеді. Атап өтсек, Күннің бетінде жүретін тәждік массаның лақтырылуы – ғарыш райының маңызды

құраушысы. Күнбеткейден келген жоғарыэнергетикалық бөлшектенен тұратын ағым Жер магнитосферасын сығып, геомагниттік дауылдарды тудыруы мүмкін [11-14]. Сонымен қатар, бірқатар таяу қарыштағы жүретін геомагниттік дауылдар, Ван Аллен радиациялық белдемшемелерінің қозуы, ионосфералық қйытқулар сияқты ғарыш райымен байланысты физикалық құбылыстар Жер серіктерімен радиобайланысқа және қашықтықтан келетін сигналдардың радиолокациялық жыпылықтауына, полярлық сәулелерге және геомагниттік индукциялық токтардың пайда болуына бірден бір себепші болады [15].

Бүгінгі таңда геомагниттік индукциялық токтар (ГИТ) негізіндегі физикалық процестерді - іргелі зерттеулер мәселелерінің негізгілерінің бірі болып тұр.

Инженерия саласында ГИТ-ті қатерлі "соққы" аспектісі ретінде қарау бастапқыда NASA-ның "Жұлдызбен өмір сүру" жобасында орын алды және осы жұмыс тобының негізгі нәтижелерінің бірі геомагниттік индукцияланған токтың мәселерінің ғылыммен техниканы ұштастыра отырып шешу керектігін көрсеткенінде болды [16]. Бұл мәселелердің маңыздылығын 1989 жылы наурызда Квебекте электр желілерінде болған ауқымды авария айқын көрсетіп тұр. Айтылып отырған аварияның негізгі себебі ретінде ГИТ электр желісіндегі қуат трансформаторларының өзекшесінің магниттелуін жартылай толқынды қанықтыруға алып келеді желінеді. Соның салдарынан трансформатор тартатын реактивті қуат артады, ал электр желісіне жүп және тақ гармоникалар еніп, орамдарда және электр жүйесінің құрылымдық элементтерінде құйынды токтарды тудыруы ықтимал. Осының салдарынан жабдықтың істен шығуы, жабдықтың бұзылуы немесе бүкіл жүйенің жұмысының тоқтауы мүмкін.

Жалпы, соңғы онжылдықта ГИТ-тың тек қана электр желісі ғана емес, сонымен қатар құбырлар мен теміржол жүйелеріне де кері әсерін тигізетіні жәйлі ғылыми еңбектер жарық көріп жатыр [17-19].

Бүгінгі таңда экстремалды ғарыш райы тудыратын қауіп қатерлер әлі де толығымен зерттемеген сала болып тұр. Маңызды инфрақұрылымдық жүйелерге, әсіресе электр қуатына әсері әлі де толық айқындалмады, дегенмен дүниежүзідік масштабта қарасақ, бұл мәселені біраз прогресс бар [20]. Қарастырылып отырған жұмыста біз ортаеңдікте ғарыш райының электр желісіне қаншалықты әсер ете алуы мүмкін екендігін және қандай физикалық

механизмдер іске қосылуы мүмкіндігін қарастырып отырмыз.

Зерттеу нәтижелері және талқылау

2016 – 2021 жылдар аралығында геомагниттік жағдайды геомагниттік жағдайды зерттелді. Қарастырылып отырған жылдар аумағында 25 геомагниттік өрістің елеулі ұйытқулары байқалды. Оның біреуі күшті дауыл,

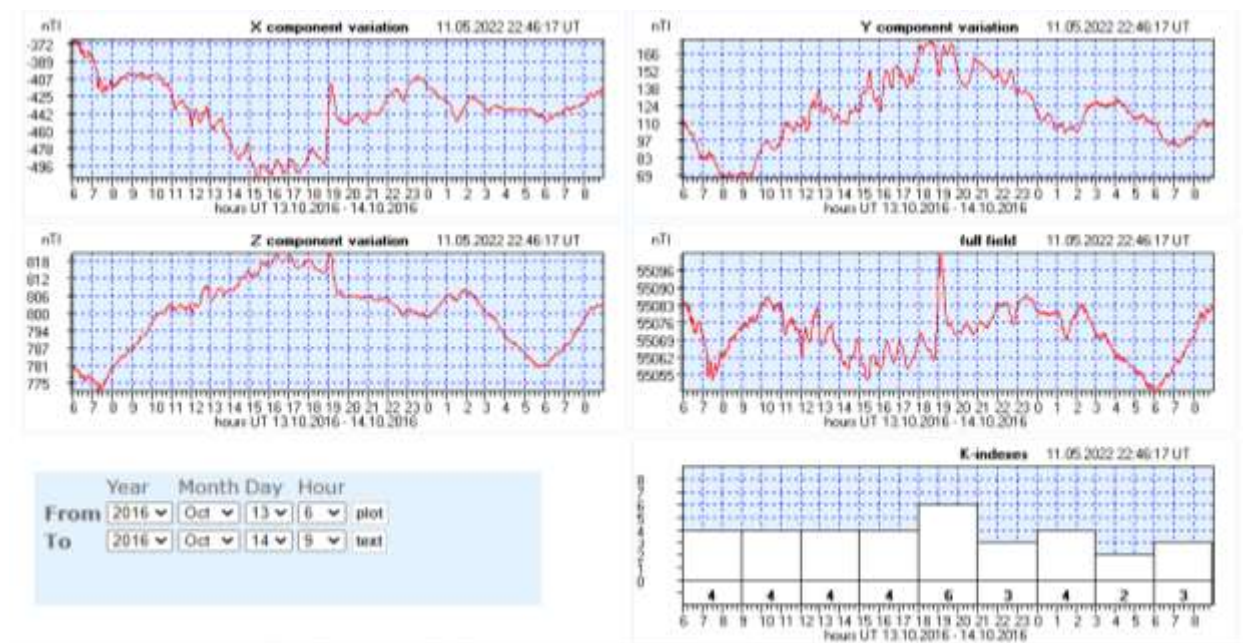
біреуі орташа дауыл, 5 – субдауыл, және 18 – магниттік дауыл болды.

Бірөлшемді моделге (1, 2 теңдеулер) сүйене отырып 2016 – 2021 жылдары аралығында таңдалып алынған геомагниттік өріс ұйытқулары байқалған кезеңдер үшін геомагниттік ток мәні бағаланды. Есептеулер үшін геомагниттік өріс мәндері алынған.

2016.03.06-2019.05.14 алынған мәндердің арасынан елеулілері 1 – кестеде және 1-6 суреттерде келтірілген.

1-кесте. 2016.10.13 – 2016.10.14 геомагнит дауыл көрсеткіштері

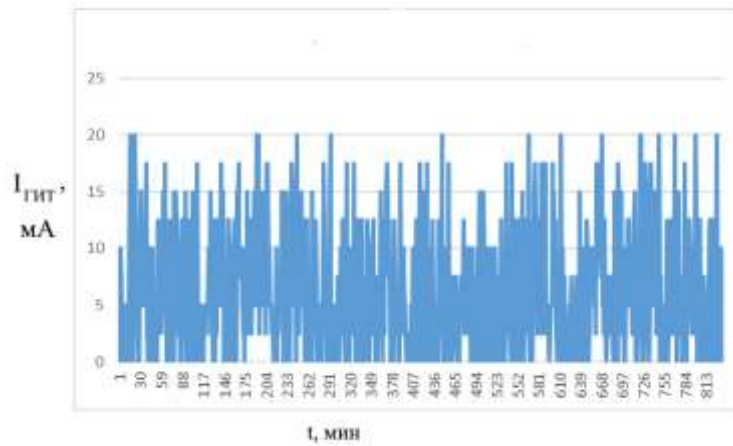
Күні	уақыты	DOY	Кр	Ар
2016-10-13	6:00:00	287	4+	32
2016-10-13	9:00:00	287	5-	39
2016-10-13	12:00:00	287	5-	39
2016-10-13	15:00:00	287	6+	94
2016-10-13	18:00:00	287	6+	94
2016-10-13	21:00:00	287	5o	48
2016-10-14	00:00:00	288	6-	67
2016-10-14	3:00:00	288	5-	39
2016-10-14	6:00:00	288	5-	39
2016-10-14	9:00:00	288	3o	15



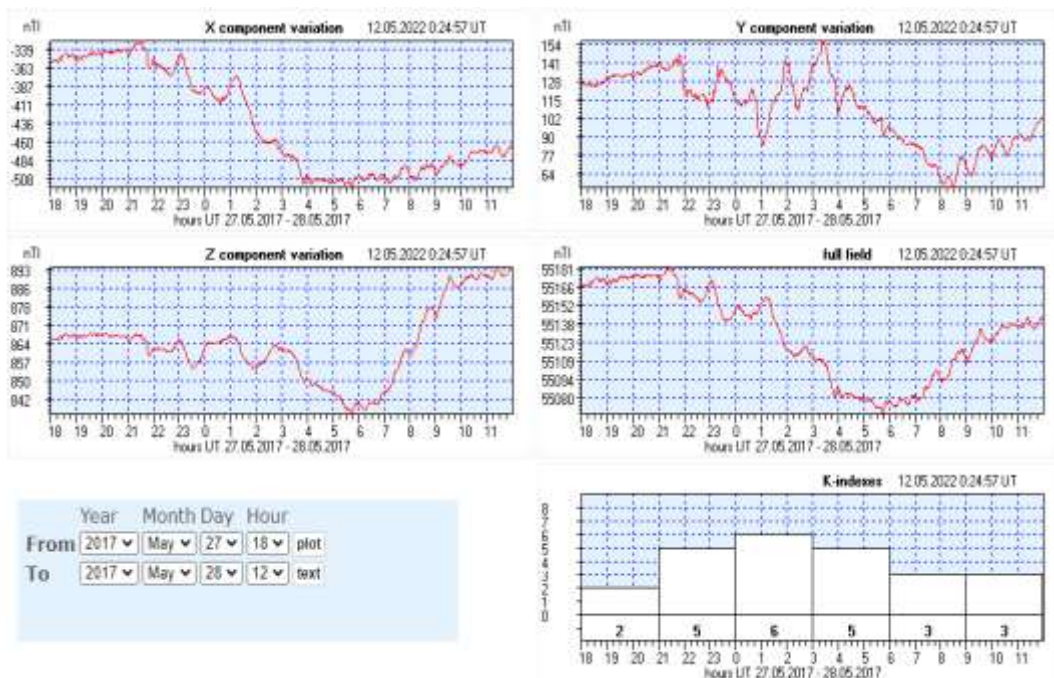
1-сурет. 2016.10.13 – 2016.10.14 геомагнит дауыл кезіндегі «Институт ионосферы» ЕЖШС «Алма-Ата» геомагнит обсерваториясының магнитометрлері тіркеген Жер геомагнит өрісінің толық векторы мен құраушыларының мәнінің өзгеруі

Геомагнит өрісінің Y-компонентасының өзгеруі көмегімен бірөлшемді модель бойынша

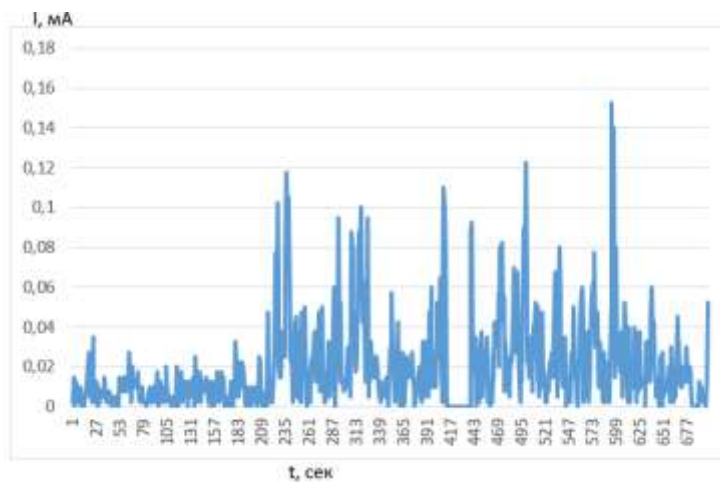
есептеулер жүргізілді. Геоиндукцияланған ток мәндері 3, 5, 7 суреттерде геомагниттік дауылдарға сәйкесінше келтірілген.



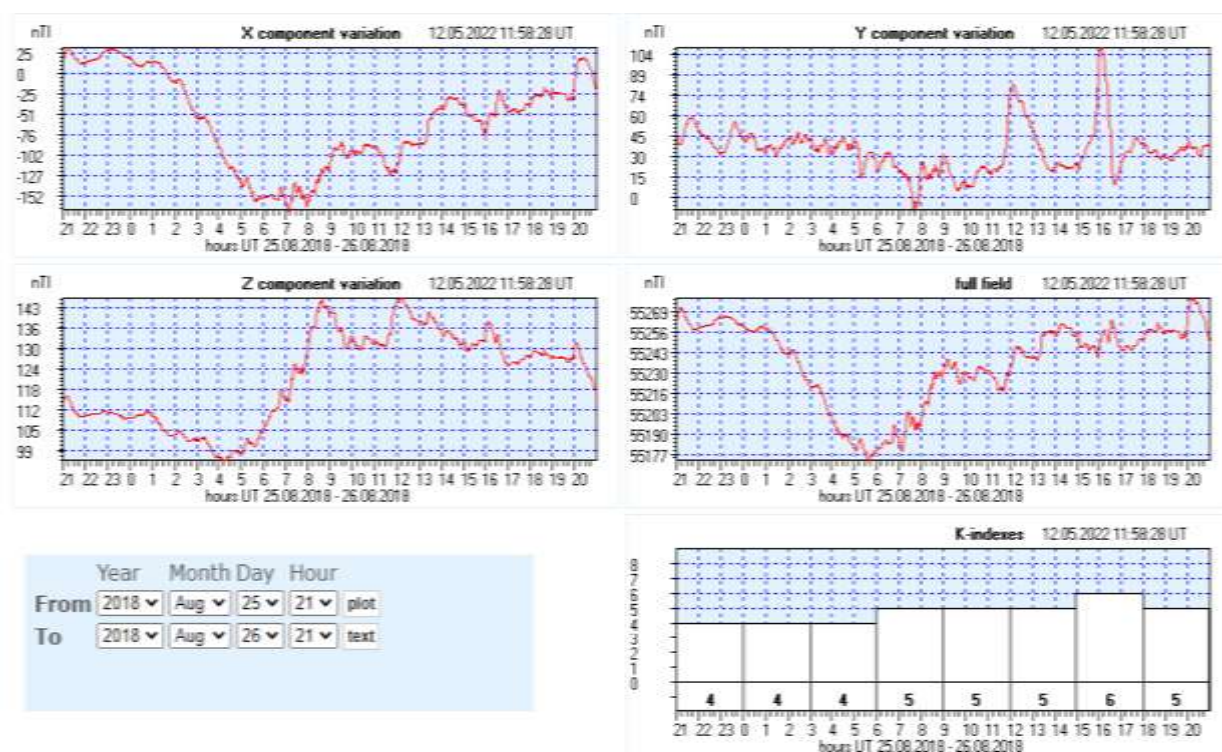
2-сурет. 2016.10.13 – 2016.10.14 геомагнит дауыл кезіндегі геоиндукцияланған ток мәндерінің өзгеруінің еспетінген мәндері



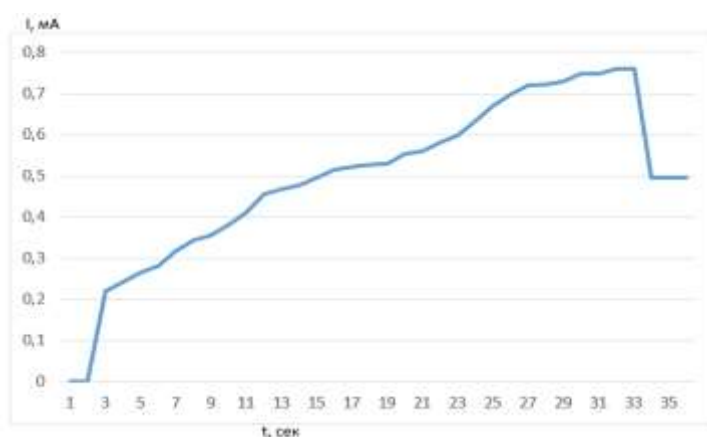
3-сурет. 2017.05.27 – 2017.05.28 аралығындағы Алматы қаласының геомагниттік көрсеткіші



4-сурет. 2017.05.27 – 2017.05.28 аралығындағы индукцияланған ток мәндері



5-сурет. 2018.08.25 – 2018.08.26 аралығындағы Алматы қаласының геомагниттік көрсеткіші



6-сурет. 2018.08.25 – 2018.08.26 аралығындағы индукцияланған ток мәндері

Қорытынды

Бұл жұмыста 2016 – 2021 жылдар аралығында орта ендікте “Алма-ата” магниттік обсерватория мәліметтеріне жүгіне отырып, 2016 жылы 25 магниттік дауыл, 2017 жылы 22 магниттік дауыл, 2018 жылы 23 магниттік дауыл, 2019 жылы 17 магниттік дауыл, 2020 жылы 19 магниттік дауыл, 2021 жылы барлығы 15 магниттік дауыл зерттелінді. Қарастырылған геофизикалық жағдайлар үшін геоиндукцияланған токтар мәні анықталып, токтардың орта ендікте индукциялану ерекшеліктері зерттелді.

2016 – 2021 жылдар аралығында геомагниттік жағдайды зерттеліп, 25 жағдай бөлініп алынды. Ол жағдайлар ішінде: 1 күшті дауыл, 1 орташа дауыл, 5 субдауыл, және 18 қарапайым магниттік дауыл болды. Осы қарастырылған 25 жағдайдар үшін индукцияланған ток мәндері бағаланды. Индукцияланған ток мәні, күшті магниттік дауыл кезінде $I=0,4$ мА құрады. Орташа магниттік дауыл кезінде $I=0,14$ мА құрады. Басталуы күрт дауыл кезінде $I=0,75$ мА құрады. Қарапайым магниттік дауыл (0,06 – 0,15) мА болды. Жалпы дауыл қарқындылығының өсуіне қарай индукцияланған ток мәні де өседі. Алайда, ерекшелік те бар.

Мысалы, басталуы күрт дауыл кезінде дауыл кр – индексіне қарап бағалағанда әлсіз дауылдар қатарына жатқанымен, индукцияланған ток мәні үлкен болып шықты. Субдауыл кезінде 0,07 – 0,13 МА ток индукцияланған. Субдауыл да зерттеулер жасаған кезде ескерілді.

Жүргізілген есептеулер индукциялық токтың амплитудасы кейбір жағдайда 20 МА дейін жеткенін көрсетеді, ал жалпы қарастырылып отырған кезеңде максималды ток мәндері әдетте күшті магниттік дауылдар кезінде 0,5 МА, орташа магниттік дауылдар кезінде 0,15 МА шамасында байқалды. Басталуы күрт геомагниттік дауыл кезінде ток мәндері 0,8 МА-ға дейін жеткен сәттер бар.

Индукциялық токтың мәні геомагниттік индукцияның қарқындылығына емес, геомагниттік өріс мәнінің өсу жылдамдығына тәуелді ететіні анықталды. Бұл тұжырымдар [25–27] жұмыстарымен жақсы сәйкес келеді.

Алғыс сөз, мүдделер қақтығысы

Ғылыми зерттеу жұмысы ҚР БҒМ қолдауындағы АР09259554 – «Геомагнитті индукцияланған токтардың магистральдық электр таратушы желілері мен мұнай-газ құбырларына әсер етуін бағалау критерилерін әзірлеу» гранты аясында жүзеге асырылды.

Әдебиеттер

- 1 Boteler, D., and Pirjola R. Modelling geomagnetically induced currents //Space Weather. – 2017. – Vol.15. – P.258–276.
- 2 Cagniard, L. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting // Geophysics. – 1953. – Vol.18(3). – P.605.
- 3 Fernberg, P. One-dimensional Earth resistivity models for selected areas of continental. – United States and Alaska, EPRI Technical Update 1026430, Palo Alto, Calif. – 2012. – P.1–190.
- 4 Forbes, K. F., and Cyr O. C. St. Solar activity and economic fundamentals: Evidence from 12 geographically disparate power grids //Space Weather. –2008. – Vol. 6. – S10003.
- 5 Glocer, A., et al. Community-wide validation of geospace model local K-index predictions to support model transition to operations //Space Weather. – 2016. – Vol. 14. – P.469–480.
- 6 Gaunt, C.T., and Coetzee G. Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC-risk // in Power Tech, 2007 IEEE Lausanne: Proceedings. Inst. of Elec. and Elec. Eng., Piscataway, N. J. – 2007. – P. 807–812.
- 7 Lehtinen, M., and Pirjola R. Currents produced in earthed conductor networks by geomagnetically-induced electric fields //Ann. Geophys. – 1985. – P.479.
- 8 Ngwira, C., Pulkkinen A., Kuznetsova, M. and Glocer A. Modeling extreme “Carrington-type” space weather events using three dimensional global MHD simulations //J. Geophys. Res. Space Physics. – 2014. – Vol. 119. – P.4456–4474.
- 9 Schrijver, C.J., et al. Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILWS //Adv. Space Res. – 2015. – Vol. 55. – P.2745–2807.
- 10 Schultz, A. EMScope: a continental scale magnetotelluric observatory and data discovery resource // Data Sci. J. – 2010. – Vol.8. – IGY6–IGY20.
- 11 D. H. Assessment of geomagnetic hazard to power systems in Canada //Nat. Hazards. – 2001. – Vol. 23. – P.101–120.
- 12 Cagniard, L. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting //Geophysics. – 1953. – Vol.18(3). – P.605.
- 13 Cardona, O.D., van Aalst M. K., Birkmann J., Fordham M., McGregor G., Perez R., Pulwarty R.S., Schipper E.L.F., and Sinh B.T. Determinants of risk: Exposure and vulnerability //in Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. – A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), edited by C.B. Field. – Cambridge Univ.: Press, Cambridge, U. K., and New York. 2012. – P.65–108.
- 14 Carter, B.A., Yizengaw E., Pradipta R., Halford A.J., Norman R., and Zhang K. Interplanetary shocks and the resulting geomagnetically induced currents at the equator //Geophys. Res. Lett. – 2015. – Vol. 42. – P.6554–6559.
- 15 Boteler, D. Distributed source transmission line theory for electromagnetic induction studies //in Supplement of the Proceedings of the 12th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility. – 1997. – P.401–408.
- 16 Gaunt, C.T. Reducing uncertainty–responses for electricity utilities to severe solar storms //J. Weather Space Clim. – 2014. – Vol.4. – P.A01.
- 17 Marshall, R.A., Smith E.A., Francis M.J., Waters C.L., and Sciffer M.D. A preliminary risk assessment of the Australian region power network to space weather //Space Weather. – 2011. – Vol. 9. – S10004.
- 18 Love, J.J., Coisson P., and Pulkkinen A. Global statistical maps of extreme-event magnetic observatory 1-min first differences in horizontal intensity //Geophys. Res. Lett. – 2016. – Vol.43. – P.4126–4135.
- 19 Liu, C.M., Liu L.G., and Pirjola R. Geomagnetically induced currents in the high-voltage power grid in China // IEEE Trans. Power Delivery. – 2009. – Vol.24. – P.4.

- 20 Козлов С.И., Власков В.А., Смирнова Н.В. Ионная кинетика, малые нейтральные и возбужденные составляющие в области D с повшемным уровнем ионизации //Космические исследования. – 1982. – Т. 20, вып. 6. – С.881-891.
- 21 Lionello R., Downs C., Linker J.A., Torok T., Riley P., and Mikic Z. Magnetohydrodynamic simulations of interplanetary coronal mass ejections //Astrophys. J. – 2013. – Vol.777 (76). – P.11.
- 22 Lehtinen, M., and Pirjola R. Currents produced in earthed conductor networks by geomagnetically-induced electric fields //Ann. Geophys. – 1985. – Vol.3(4). – P.479.
- 23 Viljanen, A., and Pirjola R. Statistics on geomagnetically-induced currents in the Finnish 400 kV power system based on recordings of geomagnetic variations //J. Geomagn. Geoelectr. – 1989. – Vol. 41. – P.411–420.
- 24 Vorobev A., Soloviev A., Pilipenko V., Vorobeveva G. and Sakharov Y. An Approach to Diagnostics of Geomagnetically Induced Currents Based on Ground Magnetometers Data //Appl. Sci. – 2022. – Vol.12(3). – P.1522.
- 25 Kikuchi T., Ebihara Y., Kumiko. K. Hashimoto, Kitamura K., Watari S.-I. Reproducibility of the Geomagnetically Induced Currents at Middle Latitudes During Space Weather Disturbances // Front. Astron. Space Sci. – 2021. – Vol. 11 October 2021. – Art.No 759431.

References

- 1 D. Boteler, and R. Pirjola, Space Weather, 15, 258–276 (2017).
- 2 L. Cagniard, , Geophysics, 18(3), 605 (1953).
- 3 P. Fernberg, One-dimensional Earth resistivity models for selected areas of continental United States and Alaska, (EPRI Technical Update 1026430, Palo Alto, Calif., 2012), 190 p.
- 4 K.F. Forbes, and O C.St. Cyr, Space Weather, 6, S10003 (2008).
- 5 A. Glocer, et al., Space Weather, 14, 469–480 (2016).
- 6 C.T. Gaunt, and G. Coetzee, Proccs, Inst. of Elec. and Elec. Eng., Piscataway, N. J. 807–812 (2007).
- 7 M. Lehtinen, and R. Pirjola, Ann. Geophys, 479 (1985).
- 8 C. Ngwira, A. Pulkkinen, M. Kuznetsova, and A. Glocer, J. Geophys. Res. Space Physics, 119, 4456–4474 (2014).
- 9 C J. Schrijver, et al., Adv. Space Res., 55, 2745–2807 (2015).
- 10 A. Schultz, Data Sci. J., 8, IGY6–IGY20 (2010).
- 11 D.H. Boteler, Assessment of geomagnetic hazard to power systems in Canada, Nat. Hazards, 23, 101–120 (2001).
- 12 L. Cagniard, Geophysics, 18(3), 605 (1953).
- 13 O.D. Cardona, and et al, Determinants of risk: Exposure and vulnerability, in Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), edited by C.B. Field, (Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K., and New York, 2012), 65–108.
- 14 B.A. Carter, E. Yizengaw, R. Pradipta, A. Halford, R. Norman, and K. Zhang, Geophys. Res. Lett., 42, 6554–6559 (2015).
- 15 D. Boteler, in Supplement of the Proceedings of the 12th Intern. Zurich Symp. and Techn. Exhibition on Electromagnetic Compatibility, 401-408 (1997).
- 16 C.T. Gaunt, J. Weather Space Clim., 4, A01 (2014).
- 17 R.A. Marshall, E.A. Smith, M.J. Francis, C.L. Waters, and M.D. Sciffer, Space Weather, 9, S10004 (2011).
- 18 J.J. Love, P. Coisson, and A. Pulkkinen, Geophys. Res. Lett., 43, 4126-4135 (2016a).
- 19 C.M. Liu, L.G. Liu, and R. Pirjola, IEEE Trans. Power Delivery, 24, 4 (2009).
- 20 S.I. Kozlov, and et al, Kosmicheskiye issledovaniya, 20 (6), 881-891 (1982). (in Russ).
- 21 R. Lionello, C. Downs, J.A. Linker, T. Torok, P. Riley, and Z. Mikic, Astrophys. J., 777(76), 11 (2013).
- 22 M. Lehtinen, R. and Pirjola, Ann. Geophys., 3(4), 479 (1985).
- 23 A. Viljanen, and R. Pirjola, J. Geomagn. Geoelectr., 41, 411–420 (1989).
- 24 A. Vorobev, A. Soloviev, V. Pilipenko, G. Vorobeveva and Y. Sakharov, Appl. Sci., 12(3), 1522 (2022).
- 25 T. Kikuchi, Y. Ebihara, Kumiko. K. Hashimoto, K. Kitamura, S.-I. Watari, Front. Astron. Space Sci., 11 October, 759431 (2021).