

УДК 551.510.535

РОСТ ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ, ВЫЗВАННЫХ КОРОНАЛЬНЫМ ВЫБРОСОМ МАССЫ И ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ПОТОКОМ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА, В 2021 ГОДУ

© 2023 г. В. Б. Белаховский^{1, *}, В. А. Пилипенко², Я. А. Сахаров^{1, 2}, В. Н. Селиванов³

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
“Полярный геофизический институт”, Апатиты, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Геофизический центр Российской академии наук”, Москва, Россия

³Центр физико-технических проблем энергетики Севера – филиал Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Федерального исследовательского центра “Кольский научный центр Российской академии наук”,
Апатиты, Россия

*E-mail: belakhov@mail.ru

Поступила в редакцию 17.09.2022 г.

После доработки 05.10.2022 г.

Принята к публикации 26.10.2022 г.

Проанализирован рост геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ), регистрируемых в ЛЭП на Кольском полуострове, во время двух типов магнитных бурь: вызванной приходом магнитного облака при корональном выбросе массы (СМЕ) и высокоскоростным потоком солнечного ветра, создающим коротящую область взаимодействия (CIR). Относительная эффективность CIR бури (отношение максимальных значений ГИТ и $|Dst|$ индекса) оказалась почти в 3 раза больше, чем для СМЕ бури. Это вызвано большим вкладом P_{13} геомагнитных пульсаций и связанных с ними сред- немасштабных вихревых токовых систем в ионосфере.

DOI: 10.31857/S0367676522700478, EDN: AITPFO

ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ) в заземленных технологических системах вызваны теллурическими электрическими полями, индуцированными изменениями магнитного поля Земли. Наиболее интенсивные токи (до сотен ампер) и электрические поля (>10 В/м) возбуждаются в высоких широтах в период геомагнитных возмущений, но период сильных магнитных бурь значительные ГИТ могут регистрироваться на средних и низких широтах [1]. Поскольку вариации ГИТ имеют более длительные временные масштабы (единицы–десятки мин) по сравнению с промышленной частотой (50/60 Гц), то такой квазипостоянный ток выводит высоковольтные промышленные трансформаторы из нормального режима работы. В результате ГИТ приводят к перепадам напряжения, росту числа гармоник в сети и искажению формы тока, перегреву силовых трансформаторов и потере реактивной мощности в высоковольтных ЛЭП. ГИТ усиливают коррозию в трубо-, нефте-, газопроводах, приводят к сбоям в работе железнодорожной автоматики. Известны многочисленные примеры катастрофических последствий [2].

Главная фаза магнитной бури или начало суббури являются причиной высокого dB/dt и рассматриваются как основной фактор риска для энергосистем на высоких широтах. Например, катастрофа энергетической системы Hydro Quebec была вызвана бурей с $dB/dt \sim 480$ нТл/мин [3], хотя влияние ГИТ на ЛЭП наблюдалось и при гораздо меньших $dB/dt \sim 100$ нТл/мин [4].

Наибольших значений скачки ГИТ достигают во время суббурь [5], также SSC (storm sudden commencement) импульсы приводят к скачкам ГИТ [6]. Крупномасштабная структура ионосферных токов на авроральных широтах в период геомагнитных возмущений преимущественно определяется западным [1] авроральным электроджетом, что проявляется в преобладании X-компоненты геомагнитного поля. Однако вклад производных dY/dt , dX/dt в рост ГИТ может быть вполне сопоставимым. Поэтому рост ГИТ определяется не только авроральным электроджетом, но и среднемасштабными [1] ионосферными токовыми системами [7, 8].

Выделяют рекуррентные и нерекуррентные магнитные бури. Рекуррентные бури происходят каждые 27 дней, соответствующие периоду вра-

шения Солнца. Нерекуррентные бури не имеют строгой периодичности в своем появлении. За нерекуррентные бури ответственны корональные выбросы массы (coronal mass ejection – CME), наблюдаемые чаще в максимуме 11-летнего цикла солнечной активности. За рекуррентные бури ответственна коротирующая область взаимодействия (corotating interaction regions – CIR), создаваемая высокоскоростными потоками солнечного ветра, истекающими из корональных дыр. CIR бури наблюдаются, как правило, в минимуме солнечной активности [9]. CIR вызывают магнитные бури слабой и средней интенсивности, минимальное значение Dst -индекса в главную фазу магнитной бури редко достигает -100 нТл. CIR бури имеют большую длительность, чем CME бури [10]. Характерной особенностью CIR геомагнитных бурь является отсутствие внезапного начала в виде SSC импульса в отличие от CME бурь. CIR бури развиваются на фоне более высокоскоростных потоков солнечного ветра и сопровождаются более высоким уровнем УНЧ колебаний в магнитосфере [10]. В результате CIR-бури приводят к более существенному ускорению магнитосферных электронов до релятивистских энергий. Естественно, возникает вопрос об эффективности генерации больших ГИТ разными типами магнитных бурь.

В данной работе в качестве первого шага решения этой задачи рассмотрено воздействие двух типов магнитных бурь (CME и CIR) на рост величины геомагнитно-индуцированных токов в линиях электропередач Кольском полуострове на примере события 3–5 ноября 2021 года и события 11–13 октября 2021 [1].

ДАННЫЕ

В работе были использованы данные по регистрации ГИТ в линиях электропередач Кольского полуострова и Карелии. Система регистрации принадлежит Полярному геофизическому институту (ПГИ) и Центру физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН и является единственной в России. Система включает себя 4 станции (Выходной – VKH, Титан – TTN, Лохви – LKH, Кондопога – KND) на линии 330 кВ и одну станцию на линии 220 кВ (Ревда – RVD). Большинство ЛЭП ориентированы в направлении север–юг; система регистрации работает с 2011 г. по настоящее время.

Величина ГИТ зависит от проводимости земной коры, то есть одно и то же по амплитуде геомагнитное возмущение может привести на подстанциях, расположенных на грунте с разной электрической проводимостью, существенно различные ГИТ [11]. Также величина ГИТ зависит от конфигурации линий электропередач, при этом наибольшие значения ГИТ наблюдаются на

тупиковых, узловых подстанциях [12]. В данной работе для сравнения двух типов магнитных бурь была использована одна и та же подстанция VKH, условия измерения на ней за промежуток времени между бурями (три недели) не менялись.

Для характеристики вариаций геомагнитного поля были использованы данные магнитометров сети IMAGE (58° – 79° геомагнитной широты). Использована двумерная модель по расчету эквивалентных ионосферных токовых систем на основе данных магнитометров сети IMAGE, построенная по методу сферических элементарных токовых систем [13]. Использованы данные магнитометра в обсерватории ПГИ Лопарская (LOR), расположенной вблизи станции VKH. Географические координаты станции LOR – $[68.63^{\circ}$ с.ш., 33.25° в.д.], геомагнитные координаты – $[64.94^{\circ}$ с.ш., 113.6° в.д.]. Параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) брали из данных базы OMNI.

АНАЛИЗ СОБЫТИЙ

Магнитная буря 3–5 ноября 2021 г.

Данная магнитная буря была наиболее сильной за последние четыре года ($Dst = -105$ нТл). Поэтому рассмотрение данного события имеет дополнительную актуальность. Хотя, нужно сказать, интенсивность данной бури была достаточно умеренной. Данная буря была вызвана приходом к земной магнитосфере межпланетного магнитного облака, вызванного CME. Примерно в 22 UT был зафиксирован SSC импульс в виде резкого скачка в $SYM-H$ индексе (рис. 1). В этом момент скорость солнечного ветра по данным базы OMNI составляла порядка 750 км/с, плотность солнечного ветра достигала около 20 см^{-3} . B_z -компонента ММП несколько раз меняла свой знак с положительного на отрицательный, приводя к проникновению плазмы солнечного ветра внутрь магнитосферы (не показано). $SYM-H$ индекс достигал значения порядка -120 нТл, AE индекс во время главной фазы бури достигал значения около 3000 нТл.

По данным станции LOR наиболее сильная суббуря во время данной бури наблюдалась в 20–23 UT, ее амплитуда в X -компоненте составила порядка 1200 нТл. Вариации геомагнитного поля в Y -компоненте во время данной суббури составляли около 500 нТл (рис. 1), что говорит о преобладании аврорального электроджета во время данного возмущения. Максимальная величина производной геомагнитного поля по времени достигала $|dX/dt| \approx |dY/dt| \approx 300$ нТл/мин, величина ГИТ по данным станции VKH для данной суббури для этого же момента времени достигала около 20 А.

Последовавшая в 00–03 UT суббуря имела меньшую интенсивность и привела к меньшим

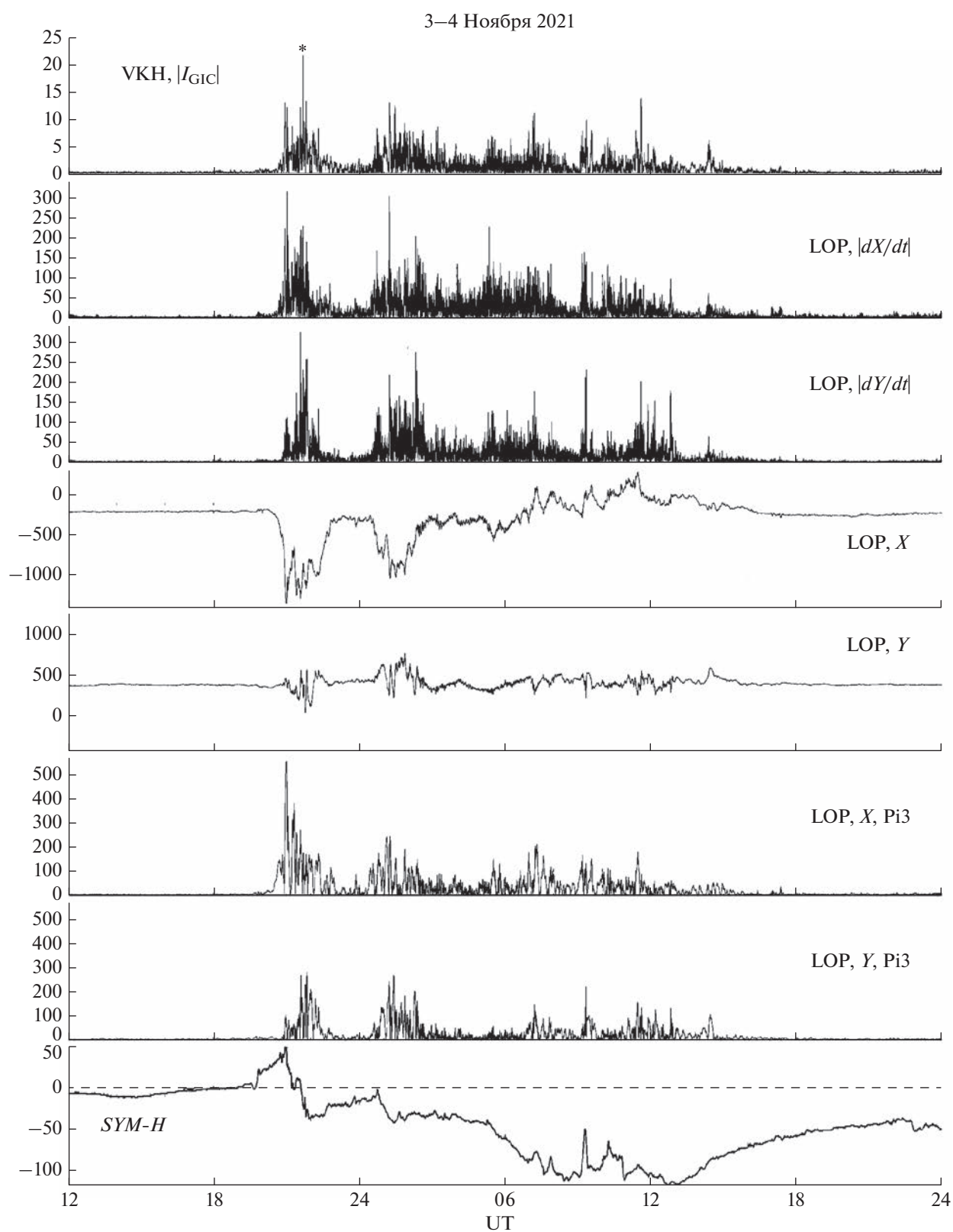


Рис. 1. Модуль ГИТ [А] на станции Выходной (VKH); модуль dX/dt [нТл/мин], модуль dY/dt [нТл/мин], X и Y -компоненты геомагнитного поля [нТл], отфильтрованные вариации X и Y -компонент геомагнитного поля [нТл] по данным станции Лопарская (LOP); SYM- H индекс [нТл] для 3–4 ноября 2021. Звездочкой на верхней панели показан момент времени, для которого построен рис. 3 (верхняя панель).

значениям ГИТ. Для данной магнитной бури заметный рост ГИТ наблюдался не только в ночном секторе, но и в дневном секторе, что было связано с развитием восточного электроджета.

Из исходных вариаций геомагнитного поля были выделены геомагнитные $Pi3$ пульсации путем вычитания низкочастотного тренда (ниже 0.5 мГц), затем был взят модуль из данных вариаций (две нижние панели на рис. 1). Видно, что вариации амплитуды $Pi3$ пульсаций хорошо коррелируют с величиной ГИТ, с вариациями dX/dt , dY/dt , что говорит о вкладе $Pi3$ пульсаций в рост ГИТ [7].

Магнитная буря 11–13 октября 2021

Данная магнитная буря была вызвана высокоскоростным потоком солнечного ветра из корональной дыры на Солнце, столкнувшимся с более медленным солнечным ветром. Данная буря относится к классу CIR (corotating interaction region). Для данного события скорость солнечного ветра составляла около 520 км/с (не показано). Наибольшее по модулю значение $SUM-H$ индекса составляло около -72 нТл (рис. 2). Bz -компонента ММП во время данной бури несколько раз меняла свой знак на положительный, что приводило к росту $SUM-H$ индекса до практически нулевых значений. Несмотря на слабую интенсивность магнитной бури, суббуревой AE индекс достигал значений порядка 2600 нТл.

Во время рассматриваемой магнитной бури по данным станции LOP наблюдалось три последовательные суббури в 19–23 UT, 23–02, 02–05 UT, сопровождавшиеся скачками ГИТ (рис. 2). Наибольшей интенсивности была третья суббуря ($\Delta X \approx 1000$ нТл), при этом и ГИТ достигает наибольшего значения (~ 40 А). В Y -компоненте геомагнитного поля наблюдается импульсное возмущение в период роста ГИТ ($\Delta Y \approx 900$ нТл). Величина $|dX/dt|$ составляла около 300 нТл/мин, $|dY/dt|$ — около 330 нТл/мин.

Во время первых двух суббурь амплитуда геомагнитных возмущений в X -компоненте составляла около 600–700 нТл, величина ГИТ достигала значений 30 и 25 А соответственно.

Амплитуда $Pi3$ пульсаций хорошо коррелирует с вариациями ГИТ и с dX/dt , dY/dt . Причем амплитуда $Pi3$ пульсаций в Y -компоненте ($\Delta Y \approx 550$ нТл) заметно превосходит амплитуду ГИТ в X -компоненте ($\Delta X \approx 550$ нТл) геомагнитного поля (рис. 2). Для ЛЭП, ориентированной в направлении север–юг, теллурические поля вдоль нее, а соответственно и ГИТ, в наибольшей степени определяются вариациями восточно–западной (Y) компонентой геомагнитного поля. Высокие значения возмущений в Y -компоненте геомагнитного поля, по-видимому, и приводят к такому значительному росту ГИТ в линиях электропередач

(до 40 А) при не самых сильных геомагнитных возмущениях в X -компоненте.

Сравнение CME и CIR событий

Чтобы как-то охарактеризовать геоэффективность магнитной бури с максимальным значением $|Dst|_{max}$ относительно возбуждения ГИТ с максимальной амплитудой J_{max} введем простой параметр $J_{max}/|Dst|_{max}$. CIR магнитная буря 11–12 октября 2021 имела интенсивность $|Dst|_{max} = 65$ нТл, меньшую чем CME магнитная буря 3–4 ноября 2021 $|Dst|_{max} = 105$ нТл. Величина геомагнитного возмущения в X -компоненте для CME события ($\Delta X = 1200$ нТл) была больше, чем для CIR события ($\Delta X = 1000$ нТл). За счет значительного возмущения в Y -компоненте геомагнитного поля ($\Delta Y = 1000$ нТл) суббуря во время CIR события привела к значению ГИТ в ЛЭП $J_{max} = 40$ А, что примерно в 2 раза превышает значения ГИТ ($J_{max} = 20$ А) во время CME события. Таким образом, эффективность CME бури $J_{max}/|Dst|_{max} = 0.19$ А/нТл, а CIR бури $J_{max}/|Dst|_{max} = 0.61$ А/нТл, то есть в 3 раза больше. Чем же это вызвано?

Для ответа на этот вопрос, рассмотрим двумерное распределение эквивалентных ионосферных токов, рассчитанных по данным магнитометров сети IMAGE в координатах широта–долгота. 2D распределение показывает, что для CME бури в момент максимальных значений ГИТ (3 ноября примерно в 21.35 UT) вблизи станции VKH в структуре ионосферных токов наблюдается преобладающий вклад западного аврорального электроджета (рис. 3, верхняя панель). Для CIR бури в момент максимальных значений ГИТ (12 октября, примерно в 03.15 UT) вблизи станции VKH наряду с авроральным электроджетом наблюдается значительный вклад вихревых токовых систем в структуру ионосферных токов (рис. 3, нижняя панель). Данный факт согласуется с большой величиной возмущения в Y -компоненте геомагнитного поля ($|\Delta Y| \sim 1000$ нТл) в период максимальных значений ГИТ, вполне сравнимого с возмущениями в X -компоненте. Моменты времени, для которых построено двумерное распределение ионосферных токовых систем (рис. 3), показаны на рис. 1 и 2 в виде звездочки на верхней панели.

Таким образом, при развитии вихревых токовых систем, связанных с продольными токами в магнитосфере, преобладают ионосферные токи в направлении север–юг. Линии электропередач на Кольском полуострове вытянуты в основном в направлении север–юг, поэтому вихревые токовые системы в ионосфере будут давать заметный вклад в рост ГИТ в этих технологических линиях.

Анализ событий за предыдущие годы [2, 5, 7, 8, 11, 15–17] с использованием данных со станции VKH показывает, что экстремальные значения

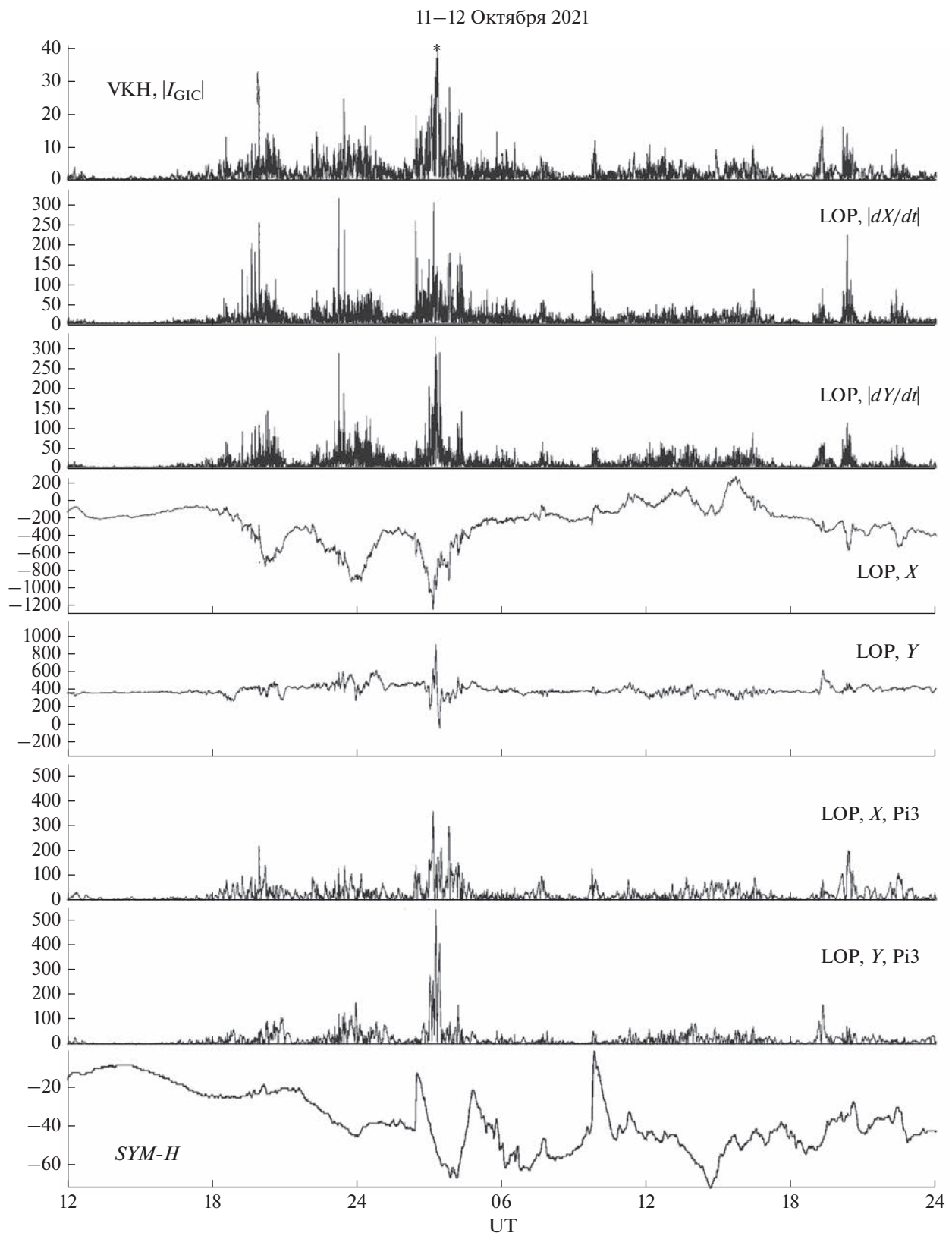


Рис. 2. Модуль ГИТ [А] на станции Выходной (VKH); модуль dX/dt [нТл/мин], модуль dY/dt [нТл/мин], X и Y -компоненты геомагнитного поля [нТл], отфильтрованные вариации X и Y -компонент геомагнитного поля [нТл] по данным станции Лопарская (LOP); $SYM-H$ индекс [нТл] для 11–12 октября 2021. Звездочкой на верхней панели показан момент времени, для которого построен рис. 3 (нижняя панель).

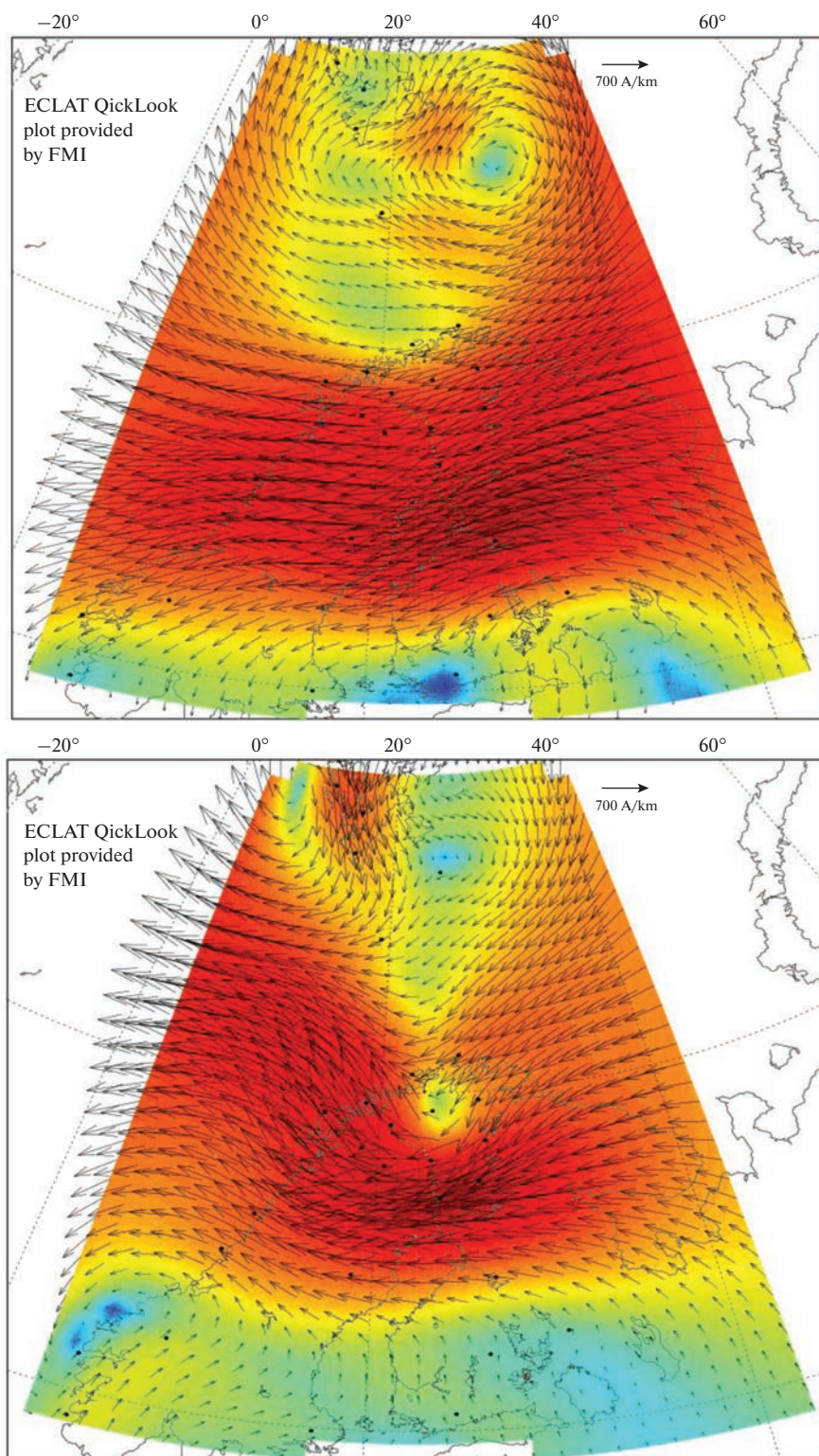


Рис. 3. Эквивалентные ионосферные токовые системы по данным магнитометров IMAGE для 3 ноября 2021, 21.35 UT (верхняя панель) и для 12 октября 2021, 03.15 UT (нижняя панель).

ГИТ, наоборот, наблюдаются во время СМЕ бурь. Поэтому рассмотренная ситуация является, скорее, исключением из общей тенденции.

В работе [14] на основе измерений в финском газопроводе Мянтьяля (фин. Mäntsälä) (57° геомагнитной широты) за несколько лет было пока-

зано, что, наоборот, СМЕ бури приводят к более значительному росту ГИТ, чем CIR бури. Однако данное исследование было проведено на субавроральных широтах.

Таким образом, величина ГИТ далеко не всегда зависит только от интенсивности магнитной бури. Развитие вихревых ионосферных токовых систем на авроральных широтах может приводить к существенным ГИТ и для более слабых CIR магнитных бурь. Представленные примеры показывают, что порой более слабые по интенсивности CIR бури могут приводить к более существенному росту ГИТ, чем СМЕ бури. Это необходимо учитывать при оперативном прогнозе воздействия космической погоды на технологические системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен рост геомагнитно-индуцированных токов, регистрируемых в линиях электропередач на Кольском полуострове, во время магнитной бури 3–5 ноября 2021 г., вызванной приходом СМЕ, и во время магнитной бури 11–13 октября 2021 г., вызванной CIR. Показано, что CIR магнитная буря, несмотря на заметно меньшую интенсивность, приводит к заметно более высоким скачкам ГИТ, чем СМЕ магнитная буря. Более высокая геоэффективность CIR бури по отношению к возбуждению ГИТ обусловлена высоким уровнем амплитуд $Pi3$ пульсаций и вариаций dB/dt . Высокие значения величины ГИТ в ЛЭП, вытянутой в направлении север–юг, во время CIR бури связаны с заметным вкладом вихревых ионосферных токовых систем в геомагнитные возмущения. При прогнозе воздействия космической погоды на технологические системы необходимо в одинаковой степени учитывать не только СМЕ, но и CIR магнитные бури.

Авторы выражают благодарность проектам IMAGE (www.ava.fmi.fi/image/), OMNI (cdaweb.gsfc.nasa.gov) за возможность использования данных.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-77-30010; Пилипенко В.А., Сахаров Я.А.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boteler D.H. // In: Space weather. AGU geophysical monograph 125, 2001. P. 347.
2. Пилипенко В.А. // Солн.–земн. физ. 2021. Т. 7. № 3. С. 72.
3. Fiori R.A.D., Boteler D.H., Gillies D.M. // Space Weather. 2014. V. 12. P. 76.
4. Kappenman J.G. // Adv. Space Res. 2006. V. 38. P. 188.
5. Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. // Физика Земли. 2018. № 1. С. 56.
6. Belakhovsky V.B., Pilipenko V.A., Sakharov Ya.A. et al. // Earth Planets Space. 2017. V. 69. No. 1. Art. No. 105.
7. Belakhovsky V., Pilipenko V., Engebretson M. et al. // J. Space Weather Space Clim. 2019. V. 9. Art. No. A18.
8. Apatenkov S.V., Pilipenko V.A., Gordeev E.I. et al. // Geophys. Res. Lett. 2020. V. 47. No. 6. Art. No. e2019GL086677.
9. Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y. et al. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. No. A4. P. 5771.
10. Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C. et al. // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. Art. No. A07S01.
11. Kozyreva O., Pilipenko V., Sokolova E., Epishkin D. // Proc. XII Int. Conf. School “Problems of Geocosmos-2018” (St-Peterburg, 2018) P. 297.
12. Селиванов В.Н., Сахаров Я.А., Ефимов Б.В. // Тр. Кольск. науч. центра РАН. 2016. Т. 39. № 5–13. С. 96.
13. Aam O., Viljanen A. // Earth Planets Space. 1999. V. 51. P. 431.
14. Kataoka R., Pulkkinen A. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. Art. No. A03S12.
15. Kozyreva O.V., Pilipenko V.A., Belakhovsky V.B., Sakharov Ya.A. // Earth Planets Space. 2018. V. 70. No. 1. Art. No. 157.
16. Belakhovsky V.B., Pilipenko V.A., Sakharov Ya.A., Selivanov V.N. // Phys. Auroral Phenom. 2019. V. 42. No. 1. P. 9.
17. Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. // Phys. Auroral Phenom. 2020. V. 43. No. 1. P. 15.

Growth of geomagnetic-induced currents during coronal mass ejection and corotating solar wind streams of geomagnetic storms in 2021

V. B. Belakhovsky^{a,*}, V. A. Pilipenko^b, Ya. A. Sakharov^{a,b}, V. N. Selivanov^c

^a Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia

^b Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119296 Russia

^c Northern Energetics Research Centre, Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, 184209 Russia

*e-mail: belakhov@mail.ru

We analyzed the growth of geomagnetically induced currents (GIC) recorded in power lines on the Kola Peninsula during two types of magnetic storms: caused by the arrival of a coronal mass ejection (CME) and caused by a high-speed corotating solar wind stream (CIR). The relative efficiency of the CIR of the storm (the ratio of the maximum values of the GIC and the $|Dst|$ index) turned out to be almost 3 times greater than that of the CME of the storm. This is caused by the large contribution of $Pi3$ geomagnetic pulsations and associated medium-scale vortex current systems in the ionosphere.