

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.5.16-28
УДК 550.338.1

**В. Г. Воробьев, Я. А. Сахаров, О. И. Ягодкина, А. А. Петрукович,
В. Н. Селиванов**

ГЕОИНДУЦИРОВАННЫЕ ТОКИ И ИХ СВЯЗЬ С ПОЛОЖЕНИЕМ ЗАПАДНОЙ ЭЛЕКТРОСТРУИ И ГРАНИЦАМИ АВРОРАЛЬНЫХ ВЫСЫПАНИЙ

Аннотация

Исследовано взаимное положение западного электроджета (WE) и границ авроральных высыпаний (AOP). Проведено сопоставление положения этих границ с регистрациями геоиндуцированных токов (ГИТ), выполненных в Северо-Западном регионе России. Показано, что в околополуночные часы MLT в периоды геомагнитных возмущений положение экваториальной границы WE может быть достаточно хорошо аппроксимировано положением экваториальной границы высыпаний AOP. Интенсивность ГИТ существенно увеличивается с ростом геомагнитной активности и достигает максимальных значений в тот период, когда экваториальная границы высыпаний AOP располагается в области зенита пункта регистрации ГИТ. Принципиальная возможность прогнозирования AL и Dst индексов создает определённые предпосылки не только для мониторинга, но и для прогнозирования положения западного электроджета и, в конечном итоге, интенсивности ГИТ на разных станциях.

Ключевые слова:

овал полярных сияний, авроральные высыпания, геоиндуцированные токи, геомагнитные возмущения, магнитные бури, магнитосферные суббури.

V. G. Vorobjev, Ya. A. Sakharov, O. I. Yagodkina, A. A. Petrukovich, V. N. Selivanov

GEOMAGNETICALLY INDUCED CURRENTS AND THEIR RELATIONSHIP WITH LOCATIONS OF WESTWARD ELECTROJET AND AURORAL PRECIPITATION BOUNDARIES

Abstract

Mutual locations of a westward electrojet (WE) and auroral oval precipitation (AOP) boundaries are examined. A comparison of these boundaries location with registrations of geoelectric currents (GIC) in the North-West region of Russia is performed. It is shown that the equatorward boundary of AOP can be a good proxy for the WE equatorward boundary in near midnight MLT sector during periods of geomagnetic disturbances. The intensity of the GIC significantly increases with geomagnetic activity and eventually reaches its maximum during the period when the AOP equatorial boundary is located in the zenith area of a GIC registration point. The basic opportunity to predict AL and Dst indexes creates certain preconditions not only for monitoring but also for forecasting the status of westward electrojet and, ultimately, the intensity of the GIC at different stations.

Keywords:

auroral oval, auroral precipitation, geoelectric currents, geomagnetic disturbances, magnetic storms, magnetospheric substorms.

Введение

Активные процессы на Солнце, связанные с коронарными выбросами массы, скоростными потоками, ударными волнами или иными неоднородностями

в солнечном ветре вызывают динамические возмущения в магнитосфере Земли, приводящие к изменениям токовых систем в магнитосфере и ионосфере Земли [1-3]. Изменения магнитосферно-ионосферных токов отражаются на земной поверхности в характерных вариациях геомагнитного поля и генерации геоэлектрического поля. В наблюдаемых записях геомагнитного поля на различных геомагнитных широтах проявляются характерные вариации в различных компонентах поля, вполне определяемые характеристиками магнитосферного возмущения и местом регистрации поля. Достаточно подробно исследованы возмущения, связанные с магнитной бурей, магнитосферной суббурей, внезапными импульсами динамического давления солнечного ветра, магнитными пульсациями различных типов [см. 4 и ссылки ней]. Геоэлектрическое поле на поверхности Земли носит, в основном, индукционный характер и определяется, в первую очередь, изменениями во времени различных частей трехмерной магнитосферно-ионосферной токовой системы. Важным фактором, влияющим на геоэлектрическое поле, является проводимость земли в рассматриваемом регионе на глубинах до сотен километров. Исходя из морфологии развития геомагнитных возмущений в авроральной и субавроральной областях ночного сектора, наиболее значимым источником геоэлектрического поля может являться западный электроджет, связанный с развитием активной фазы возмущений. Индукционный ток, который возникает в токопроводящих технологических системах, в первую очередь в протяженных линиях электропередач, является следствием генерации электрических полей на поверхности Земли. Этот ток может стать причиной нарушений в работе тех или иных сетей либо вызвать повреждение их оборудования [5, 6], что и определяет значительный интерес к исследованию развития геоиндуцированных токов (ГИТ) в периоды магнитосферных возмущений.

Целью настоящей работы является исследование взаимного положения областей регистрации ГИТ, западного электроджета (WE) и границ авроральных высыпаний в околополуночные часы местного геомагнитного времени (MLT) в периоды геомагнитных возмущений.

Взаимное расположение ионосферных токов и авроральных высыпаний

Положение авроральных электроджетов относительно областей регистрации дискретных и диффузных полярных сияний в периоды суббурь исследовалось в работе [7]. Положение границ овала дискретных форм сияний (АО – авроральный овал) в зависимости от уровня магнитной активности, выраженной величиной Q индекса, было исследовано в работе [8]. Положение экваториальной границы диффузного свечения (ДС) представлено в работе [9] в зависимости от Kp индекса. Для описания границ АО и ДС единообразным способом Старков [10] предложил аппроксимационные соотношения, используя три первые гармоники в разложении Фурье. Амплитуда и фаза гармоник определялись величиной AL индекса магнитной активности и местным геомагнитным временем.

На рис. 1, а в координатах исправленная геомагнитная широта (CGL) – местное геомагнитное время (MLT) показано положение овала полярных сияний (зеленый цвет) и примыкающей к нему с экваториальной стороны области диффузного свечения (сиреневый цвет). Схема построена в работе [7] для уровня магнитной активности $AL = -450$ нТл, наблюдаемому в период суббури 24

сентября 1998 г. Жирными цветными линиями на рис. 1а изображено среднее положение центров западного (WE), восточного (EE) и полярного (PE) электроджетов в период суббури. Для определения положения ионосферных токов в [7] были использованы данные магнитных станций Гренландии и сетей Canopus и Image.

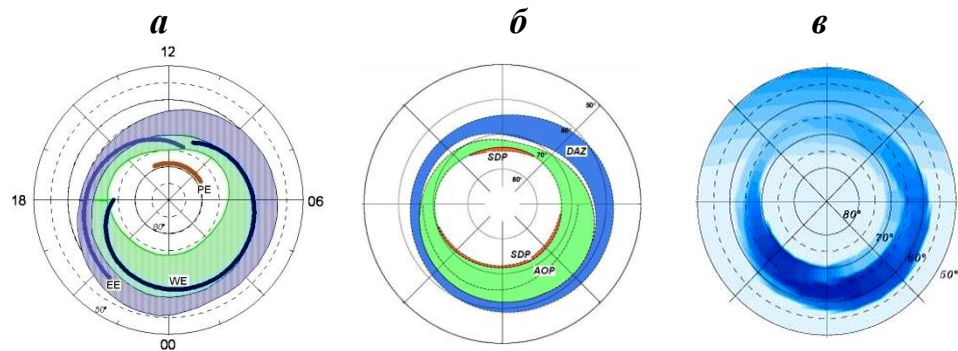


Рис. 1. (а) – взаимное положение аврального овала, пояса диффузного свечения и авральных электроджетов в период суббури 24 сентября 1998 г. [7]; (б) – положение областей авральных высыпаний по модели АРМ [11]; (в) – планетарное распределение интегральной холловской проводимости по модели АРМ.

Как видно на рис. 1, а, западный электроджет в утреннем и послеполуденном секторах MLT располагается около экваториальной границы аврального овала. Его положение постепенно смещается к полюсу в предполуденные часы и WE достигает приполюсной границы АО около 18 MLT. Восточный электроджет располагается в вечернем секторе в области диффузных авральных высыпаний и только в полуденные часы смещается к полюсу в область АО. Положение полярного электроджета на рис. 1, а показано для спокойного уровня магнитной активности. В такие периоды PE регистрируется в околополуденные часы на несколько градусов к полюсу от АО.

Аппроксимационные соотношения, представленные в работе [10], достаточно хорошо описывают положение границ овала до уровня магнитной активности $Q=7$, что примерно соответствует $AL \sim -550$ нТл. При более высоком уровне магнитной активности между узловыми значениями, которых всего шесть, по одному в каждом 4-х часовом секторе MLT, начинает «раскачиваться» синусоида, амплитуда которой быстро увеличивается с ростом магнитной активности. Это приводит к сильным искажениям положения границ АО. Фактически, определение границ АО по методу [10] может быть успешным при значениях $AL > -600$ нТл.

В работе [11] представлена модель авральных высыпаний (АРМ, auroral precipitation model), полученная по прямым наблюдениям характеристик высыпающихся частиц со спутников серии DMSP. Для заданного уровня магнитной активности АРМ позволяет построить планетарное распределение различных зон авральных высыпаний и определить средние характеристики высыпающихся частиц. Границы применимости модели: $AL > -1500$ нТл, $Dst > -$

200 нТл, хотя в работе [12] в дневном и ночном секторах модель успешно была использована для изучения магнитных бурь интенсивностью в Dst индексе -300 и -600 нТл и в AL индексе до -2500 нТл.

Положение областей авроральных высыпаний для уровня магнитной активности $AL=-450$ нТл, $Dst=-30$ нТл, соответствующего уровню возмущенности в период суббури 24 сентября 1998 г., показано на рис. 1, б. Зеленым цветом на рисунке выделена область структурированных авроральных высыпаний (AOP), с экваториальной стороны к которой примыкает область диффузных авроральных высыпаний (DAZ), а с приполюсной - зоны мягких диффузных высыпаний (SDP). Область AOP совпадает с положением овала сияний, как статистически [13], так в конкретных ситуациях, что хорошо видно из сопоставления рис. 1, а и 1, б. Некоторые расхождения в положении экваториальной границы области диффузных сияний и DAZ связаны с более грубым определением положения ДС в работе [9], где магнитная активность определялась 3-х часовым Kp индексом.

Модель APM позволяет получить не только планетарное распределение областей высыпаний, но и определить характеристики высыпающихся частиц (средние энергии и потоки энергии) в различных областях. Это даёт возможность для разных уровней магнитной активности получить такие важные характеристики, как полное энергосодержание, планетарное распределение интенсивности различных эмиссий и полос полярных сияний, планетарное распределение интегральной ионосферной проводимости. Глобальное распределение интегральной холловской проводимости ионосферы показано на рис. 1в. Численные значения проводимости определяются цветовой шкалой, максимальная интенсивность синего цвета на рис. 1, в соответствует 15 мСм. Расчет проводимости выполнен с учетом планетарного распределения характеристик, как высыпающихся электронов, так и ионов. Для расчета были использованы аналитические выражения, представленные в работах [14,15].

Из сопоставления рис. 1, а, 1, б и 1, в можно сделать вывод, что западный электроджет располагается в области структурированных авроральных высыпаний, в той части AOP, где интегральная холловская проводимость ионосферы максимальна. Можно ожидать, что в околополуночные часы западный электроджет будет располагаться очень близко к экваториальной границе AOP.

Используемые данные

Для расчета положения границ авроральных высыпаний использована модель APM [11], размещенная по адресу <http://pgia.ru/lang/ru/data>. Индексы магнитной активности взяты на страницах <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>.

Регистрация геоиндуцированных токов в Северо-Западном регионе России проводилась с помощью оригинальной системы, разработанной силами сотрудников ПГИ и ЦФТПЭС КНЦ РАН [16]. Системы сбора данных установлены на станциях: Выходной (VKH, 68.8; 33.1), Лоухи (LKH, 66.1; 33.1) и Кондопога (KND, 62.2; 34.4). В скобках указаны символы станций и их географические координаты. В статье использованы оригинальные данные, полученные с 10 с временным разрешением. Средние 1 мин значения ГИТ представлены в архиве по адресу: <http://eurisgic.org/>.

Расчет положения и интенсивности ионосферных токов выполнен на сайте Финского Метеорологического Института по магнитным наблюдениям на

цепочке станций IMAGE (<http://space.fmi.fi/MIRACLE/>). Для исследования были отобраны магнитные возмущения, наблюдаемые в интервалы мирового времени (UT), когда цепочка станций IMAGE и Северо-Западный регион России находились в околополуночном секторе MLT.

Анализ событий

В этом разделе для нескольких индивидуальных событий проведено сопоставление взаимного расположения экваториальной границы структурированных авроральных высыпаний (АОР), экваториальной границы западных ионосферных токов, полученных по данным цепочки магнитометров IMAGE, и регистрации геоиндуцированных токов (ГИТ), выполненных в Северо-Западном регионе России.

Событие 11-12 сентября 2014 г.

Данные для этого события показаны на рис. 2. На всех панелях рисунка горизонтальные шкалы по времени UT совмещены друг с другом. В интервале UT, показанном на рис. 2, а, наблюдалась небольшая магнитная буря интенсивностью в индексе SYM/H = -19 нТл. Магнитная буря началась с SSC, которое было зарегистрировано в 23:44 UT 11 сентября в виде резкого увеличения индекса SYM/H. На фазе DCF магнитной бури, которая длилась примерно 1 ч и была связана с резким увеличением динамического давления солнечного ветра, магнитное поле в авроральной зоне оставалось спокойным. Об этом свидетельствует поведение AL индекса, показанное на рис. 2, б. Магнитная активность в авроральной зоне начала увеличиваться одновременно с началом главной фазы бури. В ходе AL индекса наблюдались два пика интенсивности величиной -917 нТл и 857 нТл, зарегистрированных 12 сентября в 01:12 UT и 01:59 UT, соответственно.

На рис. 2, в показано положение экваториальной границы структурированных авроральных высыпаний АОРеq (красная кривая) в координатах исправленная геомагнитная широта (CGL) – UT. В спокойный период, примерно до 00:30 UT, экваториальная граница АОР (АОРеq) располагалась на широте $\Phi' \sim 67^\circ$ CGL и смещалась к экватору в период магнитных возмущений до $\Phi' \sim 59^\circ$ CGL при пиковых значениях AL индекса.

Вариации интенсивности ГИТ показаны на рис. 2, в синим цветом. Чтобы исключить влияние локальных факторов, интенсивность ГИТ на каждой станции нормирована на величину максимального уровня тока, наблюдаемого на данной станции в рассматриваемом интервале времени. Максимальные значения токов на станциях VKH, LKH и KND составляют 12.6, 2.6 и 2.0 А, соответственно. Шкала интенсивности токов в интервале ± 1 показана в правой части рисунка. На вертикальной шкале в левой части рисунка «нулевые» значения токов расположены на широтах станций наблюдения.

Отметим, что даже в магнитоспокойный период наблюдаются небольшие «шумовые» вариации геоиндуцированных токов. Первый кратковременный всплеск интенсивности ГИТ был зарегистрирован в момент SSC в 23:44 UT 11 сентября во всех трех пунктах наблюдения. Всплеск интенсивности ГИТ представляет собой 2-х полярную вариацию длительностью ~4 минуты. Экваториальная граница высыпаний АОР в период SSC располагалась на $\sim 2^\circ$ по широте к полюсу от самой северной станции регистрации ГИТ VKH, величина токов на которой была максимальной и составляла 7.8 А.

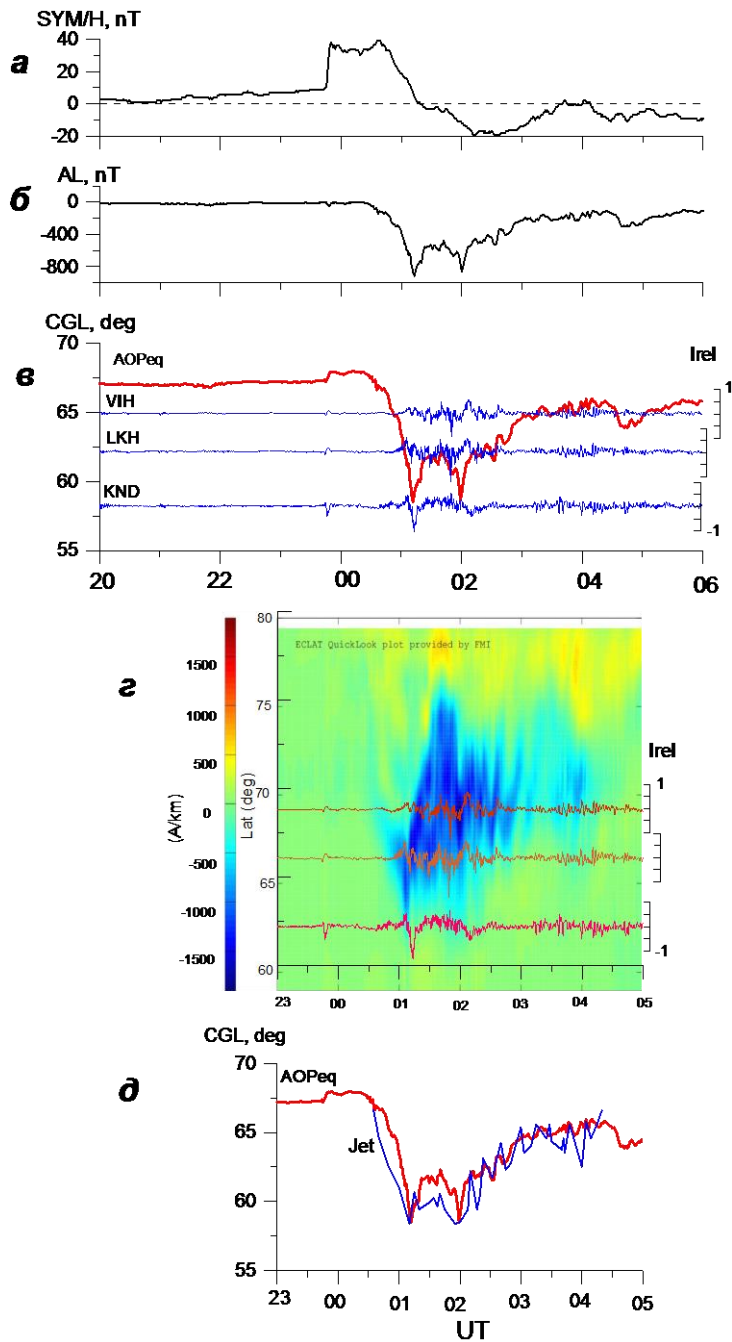


Рис. 2. 11-12 сентября 2014 г. Сверху вниз показаны: вариации индексов магнитной активности SYM/H (а) и AL (б); положение границы АОРеq (красная кривая) в координатах CGL – UT и одновременные регистрации ГИТ на широтах их наблюдения (в); положение и интенсивность WE и регистрации ГИТ в географических координатах (г); положение экваториальных границ АОРеq (красная кривая) и WE (синяя кривая) в интервале 23:00-05:00 UT (д).

Более интенсивные геоиндуцированные токи регистрируются в период магнитных возмущений, когда граница АОРeq смещается к экватору на широты пунктов регистрации ГИТ. Достаточно интенсивные токи наблюдаются и на фазе восстановления магнитной бури в интервале 03:00-05:00 UT 12 сентября, когда регистрируются быстрые вариации как магнитной активности, так и положения границы АОРeq.

На рис. 2, *г* синим цветом на зеленом фоне показана интенсивность и положение западной электроструи в координатах *географическая широта – UT*. Характеристики WE определены с использованием программы MIRACLE по магнитным наблюдениям на цепочке станций IMAGE, которая располагается на $\sim 15^\circ$ по долготе западнее пунктов регистрации ГИТ. Здесь же, как и на рис. 2, *в* показаны нормированные к «1» вариации ГИТ в интервале 23:00-05:00 UT.

Как видно на рис. 2, *г*, WE не является линейным ионосферным током, как это изображено на рис. 1, *а*, а представляет собой сумму пространственно разнесенных токов разной интенсивности. Как и следовало ожидать, интенсивность ГИТ максимальна, когда ионосферные токи находятся в районе зенита пункта наблюдения. В эти периоды величина горизонтальной компоненты магнитного поля максимальна. Изменение величины магнитного поля порождает в проводнике индукционный ток, который в нашем случае будет зависеть как от изменения величины ионосферных токов, так и от изменения расстояния от ионосферных токов до пункта наблюдения.

На нижней панели рисунка (рис. 2, *д*) представлены вариации положения экваториальных границ структурированных авроральных высыпаний (красная кривая) и западного ионосферного тока (синяя кривая) в интервале 23:00-05:00 UT. На этой панели по вертикальной оси отложена исправленная геомагнитная широта. Рисунок показывает, что положение границы авроральных высыпаний, полученное с использованием модели АРМ [11], хорошо совпадает с положением экваториальной границы ионосферных токов западного направления, наблюдаемых в период магнитных возмущений.

Событие 25-26 марта 2014 г.

Данные для этого события в интервале 18:00-04:00 UT показаны на рис. 3. На верхней панели рисунка (рис. 3, *а*) показаны характеристики WE, полученные по программе MIRACLE. Здесь же, как и на рис. 2, *г*, представлены нормированные к «1» вариации ГИТ. Максимальные значения токов на станциях VKH, LKH и KND составляют 20.5, 1.0 и 0.6 А, соответственно.

В рассмотренном интервале времени экваториальная граница западных ионосферных токов довольно быстро перемещалась к экватору. При этом были зарегистрированы две вспышки интенсивности WE примерно в 19:30 UT и 23:20 UT, сопровождающиеся быстрым расширением области ионосферных токов к полюсу. Первая вспышка наблюдалась не 5° - 6° к полюсу от наиболее высокоширотной станции регистрации ГИТ и, тем не менее, сопровождалась небольшим увеличением геоиндуцированных токов на всех станциях.

Вторая вспышка интенсивности WE произошла в зените станций VKH и LKH и сопровождалась значительным увеличением интенсивности ГИТ. Так на станции VKH максимальные значения токов в этот период были примерно в 2 раза выше, чем в событии, показанном на рис. 2. Небольшие токи в этот период наблюдались и на станции KND, расположенной на $\sim 4^\circ$ градуса по широте

экваториальнее WE. Максимальное значение тока на этой станции было примерно в 3 раза меньше, чем в событии, показанном на рис. 2.

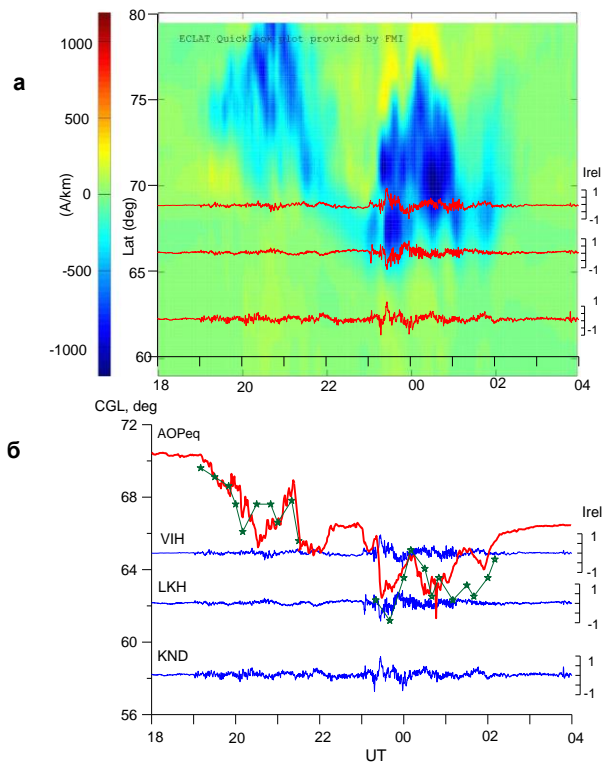


Рис. 3. 25-26 марта 2014 г.: (а) - положение и интенсивность WE и регистрации ГИТ в географических координатах; (б) - положение экваториальных границ АОРеq (толстая красная кривая) и WE (звездочки, тонкие кривые) и синим цветом - одновременные регистрации ГИТ на широтах их наблюдения.

На рис. 3, б толстая красная кривая показывает положение экваториальной границы структурированных авроральных высыпаний, а звездочки, соединенные тонкими линиями – положение экваториальной границы WE. Вертикальная шкала в этой части рисунка показывает исправленную геомагнитную широту. Если учесть, что положение границы АОРеq получено по модели АОР, которая при данном уровне магнитной активности дает среднестатистическое положение границы, то можно считать достаточно хорошим совпадение в положении границ высыпаний и токов.

Синим цветом на рис. 3, б показана нормированная интенсивность ГИТ на широтах их регистрации. Основные особенности поведения ГИТ были рассмотрены выше.

Событие 15-16 февраля 2014 г.

Данные для этого события показаны на рис. 4. Формат рисунка соответствует формату рис. 3. На рис. 4, а показаны характеристики WE и нормированные к «1» вариации ГИТ. Максимальные значения токов на станциях

VKH, LKH и KND составляют 16.5, 2.7 и 1.7 А, соответственно. В этом событии фаза развития магнитосферной суббури началась в ~00:10 UT формированием интенсивного западного электроджета. Примерно в 00:30 UT началась фаза восстановления суббури, в период которой WE перемещается на более высокие широты. На рис. 4, *a* хорошо видно, что интенсивность ГИТ максимальна в те периоды времени, когда западные ионосферные токи регистрировались в области зенита пункта наблюдения. Суббурия началась несколько полюснее зенита станции KND. Интенсивность ГИТ на этой станции примерно в 3 раза превышает интенсивность геоиндуцированных токов в событии, показанном на рис. 3, когда суббурия началась ~4° градуса по широте севернее зенита этой станции.

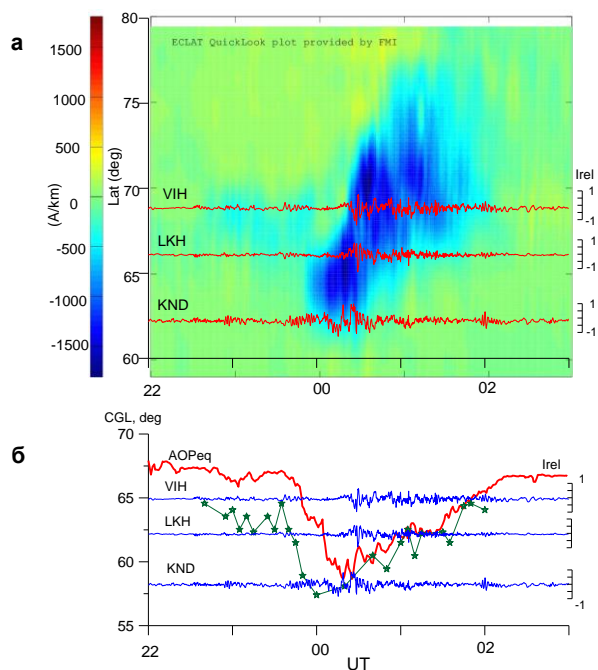


Рис. 4. 15-16 февраля 2014 г.: (*a*) - положение и интенсивность WE и регистрации ГИТ в географических координатах; (*б*) - положение экваториальных границ AOPeq (толстая красная кривая) и WE (звездочки, тонкие кривые) и синим цветом - одновременные регистрации ГИТ на широтах их наблюдения.

На рис. 4, *б* показано взаимное положение экваториальной границы структурированных авроральных высыпаний (толстая красная кривая), и экваториальной границы западного ионосферного тока (звездочки, тонкие линии). Широтные положения границ достаточно хорошо совпадают в период регистрации интенсивного западного электроджета. Однако рисунок показывает и существенное расхождение границ до начала фазы развития суббури в ~00:10 UT. Это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, до ~00:10 UT западного электроджета не существует, а эквивалентная ионосферная токовая система имеет вид DP-2. Во-вторых, по всей вероятности, модель AOP недостаточно хорошо описывает положение экваториальных границ высыпаний в период фазы

зарождения суббури. Известно, что на фазе зарождения интенсивность магнитных возмущений незначительная и составляет 100-200 нТл, в то время как область авроральных высыпаний значительно смещается к экватору. Величина этого смещения определяется не уровнем AL и Dst индексов, на которых ориентирована модель АРМ, а, скорее, величиной южной компоненты межпланетного магнитного поля.

События 25-26 января 2014 г. и 24-25 октября 2011 г.

Данные для этих событий показаны на рис. 5. Формат рисунков соответствует формату рис. 2. *в*. На рис. 5, *а* показаны вариации положения экваториальной границы структурированных авроральных высыпаний (АОРeq) и нормированные к «1» регистрации ГИТ в интервале 18:00-04:00 UT 25-26 января 2014 г. Максимальный уровень магнитной активности в рассматриваемом интервале UT составлял AL= -539 нТл и SYM/H= -22 нТл. С ростом уровня магнитной активности граница АОРeq смещается в более низкие широты и располагается в период возмущений экваториальнее станции VKH, примерно в районе зенита станции LKH. В этот период значительно увеличивается интенсивность геоиндуцированных токов. Максимальные значения токов на станциях VKH, LKH и KND составляют 8.6, 0.8 и 0.5, соответственно.

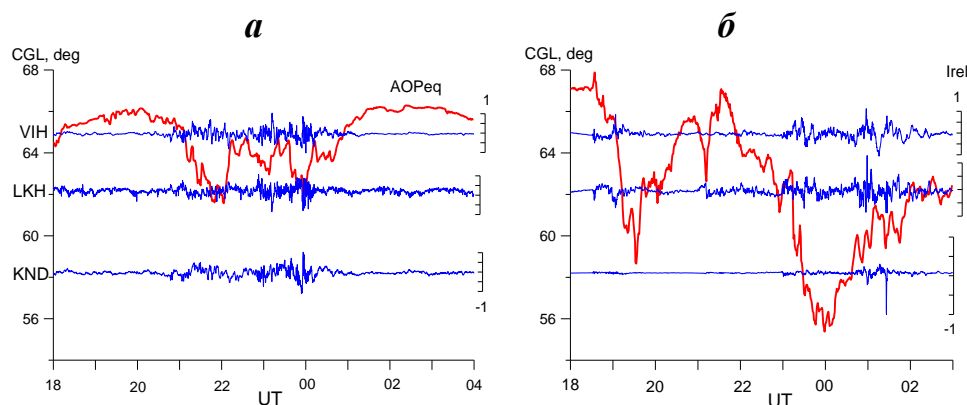


Рис. 5. События 25-26 января 2014 г. (а) и 24-25 октября 2011 г. (б). Красные кривые - положение экваториальной границы структурированных авроральных высыпаний (АОРeq); синие кривые - нормированные к «1» вариации ГИТ на широтах пунктов их регистрации.

Станция KND располагалась на 4-5° широты экваториальнее границы авроральных высыпаний. Максимальное значение ГИТ на этой станции составляло всего 0.5 А, что 3 раза меньше, чем в событии 15-16 февраля 2014 г., рассмотренном на рис. 4, когда граница АОРeq при своем смещении к экватору достигала зенита KND.

На рис. 5, б представлены аналогичные данные, но для события 24-25 октября 2011 г. В модели АРМ [11] изменение положения экваториальной границы высыпаний фактически отслеживает вариации AL индекса магнитной активности, скорректированные на величину индекса SYM/H. На рис. 5, б можно видеть три бухтообразные вариации в положении границы АОРeq. В рассмотренный на рис 5, б

период времени наблюдалась сильная магнитная буря интенсивностью -160 нТл в индексе SYM/H. Магнитная буря началась 24 октября 2011 г. с SSC в 18:31 UT, которое сопровождалось кратковременным всплеском интенсивности ГИТ на всех станциях. Всплеск интенсивности имел вид 2-х полярной вариации длительностью ~ 6 мин с максимальной амплитудой 2.4 А на станции VKN.

Данные, представленные на рис. 5, б, ясно указывают на то, что интенсивность ГИТ на станциях наблюдения резко возрастает, когда граница АОРе_q при своем смещении сначала к экватору, а затем к полюсу достигает зенита той или иной станции. При максимальном смещении около местной геомагнитной полуночи граница АОРе_q достигает $\sim 55.5^\circ$ CGL ($AL = -1054$ нТл и $SYM/H = -115$ нТл). В этот период граница высыпаний располагается на $\sim 2.0^\circ - 2.5^\circ$ широты экваториальнее станции KND. Максимальные значения ГИТ в этом событии на станциях VKN, LKN и KND составляют 17.8 , 3.9 и 16.2 А, соответственно. Следует особо отметить, что в этом событии интенсивность ГИТ на KND значительно выше, чем во всех событиях, рассмотренных выше.

Обсуждение результатов, заключение

В работе проведено исследование взаимного положения западного электроджета (WE) и границ авроральных высыпаний. Положение WE и экваториальной границы структурированных высыпаний (АОР) сопоставлено с регистрациями геоиндуцированных токов, выполненных в Северо-Западном регионе России.

В результате исследования было показано, что в околополуночные часы местного геомагнитного времени в периоды геомагнитных возмущений положение экваториальной границы западного электроджета может быть достаточно хорошо аппроксимировано положением экваториальной границы структурированных авроральных высыпаний (АОР).

Положение границ высыпаний рассчитывалось с помощью модели APM [11], которая в дальнейшем может быть использована как инструмент для мониторинга области локализации западного электроджета. Положение границ высыпаний в модели APM определяется уровнем геомагнитной активности – текущими значениями AL и Dst (SYM/H) индексов. В настоящее время существует несколько сайтов, в том числе и российских (например, <http://spacelab.minimuniver.ru>; <http://spaceweather.ru>), на которых осуществляется прогноз Dst индекса. Возможность прогнозирования AL индекса на базе искусственных нейронных сетей показана в работе [17]. Все это создает определённые предпосылки не только для мониторинга, но и, с использованием данных космических аппаратов в точке либрации, прогнозирования положения западного электроджета и, в конечном итоге, интенсивности ГИТ на разных станциях. Интенсивность ГИТ увеличивается с ростом геомагнитной активности и достигает максимальных значений в тот период, когда экваториальная граница высыпаний АОР располагается на $1.0^\circ - 1.5^\circ$ широты экваториальнее зенита пункта регистрации ГИТ. В этот период влияние холловских токов, протекающих на высотах E-слоя ионосферы, на величину геомагнитного возмущения и интенсивность ГИТ максимальна. Однако, небольшие, но хорошо выраженные увеличения ГИТ в период возмущений регистрируются и на расстояниях $3^\circ - 4^\circ$ к экватору от нижней кромки WE.

Рост геомагнитной активности символизирует увеличение интенсивности WE и сопровождается смещением экваториальной границы АОР в более низкие широты. Другими словами, чем ниже экваториальная граница АОР, тем большую

интенсивность имеют ионосферные токи и их временные вариации. В этой связи непрерывная регистрация ГИТ на меридиональной цепочке пунктов регистрации, наряду с данными магнитовариационных станций, может служить индикатором уровня геомагнитной активности.

Интенсивность ГИТ увеличивается и во время SSC. Всплеск интенсивности геоиндуцированных токов, как правило, имеет вид 2-х полярной вариации длительностью ~4-6 мин с амплитудой от единиц до десятка ампер. Всплеск интенсивности наблюдается в большом диапазоне широт как в авроральной, так и в субавроральной области. Генерация ГИТ в этот период, по всей вероятности, связана с быстрым формированием и распадом глобальной ионосферной токовой системы SSC.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН «Арктика – научные основы новых технологий освоения, сохранения и развития». Авторы благодарят создателей Интернет порталов <http://pgia.ru/lang/ru/data>, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>, <http://eurisgic.org/> и <http://space.fmi.fi/MIRACLE/> за предоставление свободного доступа к размещенным на них материалам и базам данных.

Литература

1. Echer E., Gonzalez W.D., Guarnieri F.L., Lago A.D., Vieira L.E.A., Introduction to space weather // *Adv. Space Res.* 2005. 35(5). P. 855–865. Doi:org/10.1016/j.asr.2005.02.098.
2. Gosling J.T. Coronal mass ejections: an overview // *Coronal Mass Ejections, Geophysical Monograph Series*. 1997. Ed. by N. Crooker, J.A. Jocelyn, J. Feynman. Vol. 99 (American Geophys. Union. Washington DC). P. 9-16. Doi:org/10.1029/GM099p0009.
3. Tsurutani B.T., Lakhina G.S. An extreme coronal mass ejection and consequences for the magnetosphere and Earth // *Geophys. Res. Lett.* 2014. 41. P. 287–292. Doi:org/10.1002/2013GL058825.
4. Oliveira D. M., Ngwira C. M., Geomagnetically Induced Currents: Principles // *Braz. J. Phys.* 2017. 47:552–560. Doi:10.1007/s13538-017-0523-y.
5. Трищенко Л.Д. Геомагнитные возмущения и системы энергоснабжения и проводной связи // *Плазменная гелиогеофизика*. 2008. Т. 2. Под ред. Зеленого Л.М., Веселовского И.С.: ФИЗМАТЛИТ. ISBN 978-5-922191041-9. С. 213 – 219.
6. Viljanen A., Pitjola R., Geomagnetically induced currents in the Finnish high-voltage power system // *Surv. Geophys.* 1994. V.15. No. 4. P. 383– 408. Doi:org/10.1007/BF00665999.
7. Feldstein Y.I., Prigancova A., Vorobjev V.G., Cumnock J.A., Starkov G.V., Yagodkina O.I., Blomberg L.G. High-latitude electrojets, auroral luminosity and auroral particle precipitations // “Physics of Auroral Phenomena”. Proc. XXX Annual Seminar. Apatity. 2007. P. 55-59.
8. Feldstein Y.I. and Starkov G.V. Dynamics of auroral belt and polar magnetic disturbances // *Planet. Space Sci.* 1967. V.15. P. 209-229.
9. Gussenhoven M.S., Hardy D.A., Heinemann N. Systematics of the equatorward diffuse auroral boundary // *J. Geophys. Res.* 1983. V.88. P.5692-5704.
10. Старков Г.В. Математическое описание границ аврорального свечения // *Геомагнетизм и аэрономия*. 1994. Т.34. С.80- 86.

11. Vorobjev V.G., Yagodkina, O.I., Katkalov, Y. Auroral Precipitation Model and its applications to ionospheric and magnetospheric studies // J. Atm. S-Terr. Phys. 2013. V. 102. P. 157 – 171. Doi:10.1016/j.jastp.2013.05.007.
12. Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Динамика авроральных высыпаний в периоды сильных магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрoномия. 2007. Т. 47. № 2. С. 198-205.
13. Старков Г.В., Реженoв Б.В., Воробьев В.Г., Фельдштейн Я.И. Планетарное распределение авроральных высыпаний и их связь с областями аврорального свечения. Геомагнетизм и аэрoномия. 2003. Т. 43. № 5. С. 569-578.
14. Robinson R.M., Vondrak R.R., Miller K., Dabbs K., Hardy D. On calculating ionospheric conductances from the flux and energy of precipitating electrons // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. No. 3. P. 2565–2569.
15. Galand M., Richmond A.D. Ionospheric electrical conductances produced by auroral proton precipitation // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. No. A1. P. 117-125.
16. Сахарoв Я.А., Катъкалов Ю.В., Селиванoв В.Н., Вильянен А. Регистрация геоиндуктированных токов в региональной энергосистеме // Практические аспекты гелиогеофизики. Материалы XI-ой ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе». 17 февраля 2016 г. Москва. ИКИ. 2016. С. 134-145.
17. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И. Отражение динамики параметров солнечного ветра в процессе формирования суббулевой активности // Геомагнетизм и аэрoномия. 2017. Т. 57. № 3. С. 273–279.

Сведения об авторах

Воробьев Вячеслав Георгиевич,

д.ф.-м.н., г. н. с., Полярный геофизический институт, Апатиты;
E-mail: vorobjev@pgia.ru

Сахаров Ярослав Алексеевич

к.ф.-м.н., зав. лаб., Полярный геофизический институт, Апатиты;
E-mail: sakharov@pgia.ru

Ягодкина Оксана Ивановна,

к.ф.-м.н., с. н. с., Полярный геофизический институт, Апатиты;
E-mail: oksana41@mail.ru

Петрукович Анатолий Алексеевич

д.ф.-м.н., директор Института Космических Исследований РАН, Москва;
E-mail: a.petrukovich@cosmos.ru

Селиванов Василий Николаевич

к.т.н., директор Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, Апатиты; E-mail: selivanov@ien.kolasc.net.ru