

УДК 523.72:550.385.27

## НАБЛЮДЕНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ РОССИИ: ОТДЕЛЬНЫЕ СЛУЧАИ

© 2022 г. И. В. Дэспирак<sup>1</sup>, \*, П. В. Сецко<sup>1</sup>, Я. А. Сахаров<sup>1</sup>,  
А. А. Любчик<sup>1</sup>, В. Н. Селиванов<sup>2</sup>, Д. Валев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Полярный геофизический институт, г. Апатиты (Мурманская обл.), Россия

<sup>2</sup>Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН,  
г. Апатиты (Мурманская обл.), Россия

<sup>3</sup>Институт космических исследований и технологий Болгарской Академии Наук,  
г. Стара Загора, Болгария

\*e-mail: [despirak@gmail.com](mailto:despirak@gmail.com)

Поступила в редакцию 15.04.2022 г.

После доработки 24.05.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

В работе исследовано несколько событий регистрации интенсивных геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) в трансформаторах на станциях, расположенных на Карело-Кольской ЛЭП на Северо-Западе России, и в магнитометре на компрессорной станции газопровода, находящейся вблизи г. Мантсала в Финляндии. Использование двух разных систем регистрации ГИТ, расположенных в авроральной и субавроральной зонах, позволило проследить возникновение и динамику ГИТ от субавроральных до высоких широт и сравнить их с движением суббуревого западного электроджета по данным скандинавской сети магнитометров IMAGE. Для детального исследования было выбрано два события – 15 марта 2012 года и 17 марта 2013 года, когда в исследуемых технологических сетях наблюдались интенсивные ГИТ. Показано, что развитие ГИТ на меридиональном профиле наблюдений происходило в соответствии с широтным движением западного электроджета и соответствовало появлению последовательных интенсификаций суббури. Кроме того, установлена связь между появлением ГИТ и увеличением интенсивности и волновой активности суббури, определенных по  $IL$ - и  $Wp$ - геомагнитным индексам.

DOI: 10.31857/S0016794022060037

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Быстрые изменения геомагнитного поля обычно связаны с приходом к Земле ударных волн солнечного ветра, корональных выбросов массы (СМЕ) и высокоскоростных потоков из корональных дыр, которые приводят к развитию магнитных бурь и суббурь, а также возникновению магнитных пульсаций. Во время этих событий индуцируются электрические поля, которые в свою очередь, могут создавать интенсивные, низкочастотные, квази-постоянные токи в наземных технологических сетях, называемые геоиндуцированными токами (ГИТ) [Viljanen et al., 2006; Pulkkinen et al. 2005; Lakhina et al., 2020]. Таким образом, ГИТ являются конечным звеном в цепочке связи Солнце–солнечный ветер–магнитосфера–ионосфера–Земля, при этом они могут негативно влиять на линии электропередач, газопроводы, телекоммуникационные кабели и оборудование железных дорог вплоть до полного их выхода из строя [Tsurutani et al., 2021]. Надо отметить, что интенсивность ГИТ зависит как от ин-

тенсивности магнитных возмущений, так и от конфигурации технологической системы, где подобные токи появляются: географического расположения технологической сети, проводимости земной поверхности в месте расположения, технического состояния сети и т.д. [Clilverd et al., 2018].

Наряду с исследованиями причин возникновения ГИТ, важной частью задачи защиты от негативного воздействия космической погоды является мониторинг возмущений геомагнитного поля и регистрация развития ГИТ в реальных энергосистемах. Контроль за возбуждением ГИТ в линиях электропередач (ЛЭП) осуществляется во многих странах, расположенных как в высоких, так и в средних геомагнитных широтах, в том числе в Финляндии, Великобритании, Канаде, США, Китае, Японии. Разрабатываются системы защиты от негативного воздействия ГИТ, а также сервисы прогнозирования и оповещения об изменениях геомагнитной активности. В России на ряде трансформаторных подстанций Карело-

Кольской линии электропередач, которая проходит с юга на север по Карелии и Кольскому полуострову, была создана система непрерывного учета ГИТ [Сахаров и др., 2019]. Благодаря европейской научной программе EURISGIC удалось организовать систему непрерывных наблюдений в 3–5 узлах действующей линии электропередач с 2011 года по настоящее время [Сахаров и др., 2007; 2016]. Надо отметить, что эта система регистрации ГИТ расположена на географической широте от 60° до 69° N, то есть в тех широтах, где на данном меридиане обычно наблюдаются суббури. Исходя из морфологии развития геомагнитных возмущений в авроральной и субавроральной зонах, можно предположить, что наиболее значимым источником ГИТ на Северо-Западе России может быть усиление и движение электроджетов во время взрывной фазы суббури. Так, недавно было показано, что интенсивность ГИТ существенно увеличивается с ростом геомагнитной активности и достигает максимальных значений в период, когда экваториальная граница высыпаний аврорального овала располагается на ~1° широты южнее места регистрации ГИТ [Воробьев и др., 2018]. Кроме того, при изучении интенсивных ГИТ (>30 А) за 20-летний период (1999–2019) на подстанции Мантсала, Финляндия (~60.6° географической широты) было показано, что наиболее частой (76%) причиной их появления являются усиления авроральных электроджетов во время суперсуббурь ( $SML < -2500$  нТл) и интенсивных суббурь ( $-2500$  нТл  $< SML < -2000$  нТл) [Tsurutani et al., 2021].

Целью нашей работы является исследование связи между появлением ГИТ и пространственно-временным развитием интенсивных суббурь. Для этой цели были использованы данные систем регистрации ГИТ на Северо-Западе России и на газопроводе Мантсала в Финляндии. Были отобраны случаи, когда ГИТ на станции Мантсала превышал 30 А, а также примерно в это время были зарегистрированы ГИТ на Карело-Кольской линии электропередач. В данной статье мы рассматриваем два события 15 марта 2012 г. и 17 марта 2013 года.

## 2. ДАННЫЕ

Для анализа появления ГИТ использовались данные двух систем регистрации: данные системы EURISGIC (<http://eurisgic.ru>), находящейся на Северо-Западе России, в авроральной зоне, где для измерений ГИТ используется метод регистрации тока в нейтральной силовой трансформаторе [Сахаров и др., 2007; 2016], и данные системы регистрации ГИТ в Финляндии, полученные с газопровода вблизи г. Мантсала (MAN) (~58° MLAT) в субавроральной зоне (<https://space.fmi.fi/gic/index.php>). На рисунке 1 представлена схема раз-

мещения подстанций регистрации ГИТ и расположенных рядом обсерваторий измерения геомагнитных вариаций, как на Северо-Западе России, так и в Финляндии. Стрелками и надписями указаны подстанции, данные которых используются в работе: станции Выходной (VKH) (68.8° N, 33.1° E), Ревда (RVD) (67.9° N, 34.1° E), Кондопога (KND) (62.2° N, 34.3° E) и Мантсала (MAN) (60.6° N, 25.2° E), указаны географические координаты станций.

Пространственное распространение суббури определялось по магнитометрам сетей IMAGE (<http://space.fmi.fi/image>) и SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>). Кроме того, для исследования пространственного распределения магнитных возмущений на профиле IMAGE были проанализированы мгновенные карты распределения ионосферных эквивалентных электрических токов (<https://space.fmi.fi/MIRACLE/>) [Viiljanen and Häkkinen, 1997]. Отметим, что эти карты строятся в географических координатах и, соответственно, в целях сравнения результатов далее в статье приведены географические координаты магнитных обсерваторий и станций регистрации ГИТ. Глобальное пространственное распределение суббури определялось также по картам векторов магнитного поля, полученных по данным наблюдений на сети SuperMAG [Gjerloev, 2009; Newell and Gjerloev, 2011].

Локальная геомагнитная активность на скандинавском меридиане IMAGE определялась по *IL*-индексу, который вычисляется по той же методике, что и *AL*-индекс [Davis and Sugiura, 1966], но по данным наблюдений на сети IMAGE ([https://space.fmi.fi/image/www/il\\_index\\_panel.php](https://space.fmi.fi/image/www/il_index_panel.php)). Кроме того, начало и развитие суббури контролировалось с помощью волнового планетарного *Wp* (Wave and planetary) — индекса, который характеризует волновую активность суббури, связан с мощностью  $Pi2$  пульсаций на низких широтах и рассчитывается по данным 11 наземных магнитных станций, расположенных в полосе между 20° и 50° магнитной широты MLAT вокруг Северного полюса [Nose et al., 2012] (<https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/~nose.masahito/s-cubed/data/index.html>).

Развитие сияний во время суббури контролировалось по данным камеры всего неба MAIN (Multiscale Aurora Imaging Network) в Апатитах (<http://aurora.pgia.ru>).

Условия в солнечном ветре и межпланетном магнитном поле (ММП) перед началом суббурь определялись с помощью базы данных CDAWeb OMNI (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). Потoki и структуры солнечного ветра были определены согласно каталогу крупномасштабных явлений солнечного ветра (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/>) [Ермолаев и др., 2009].



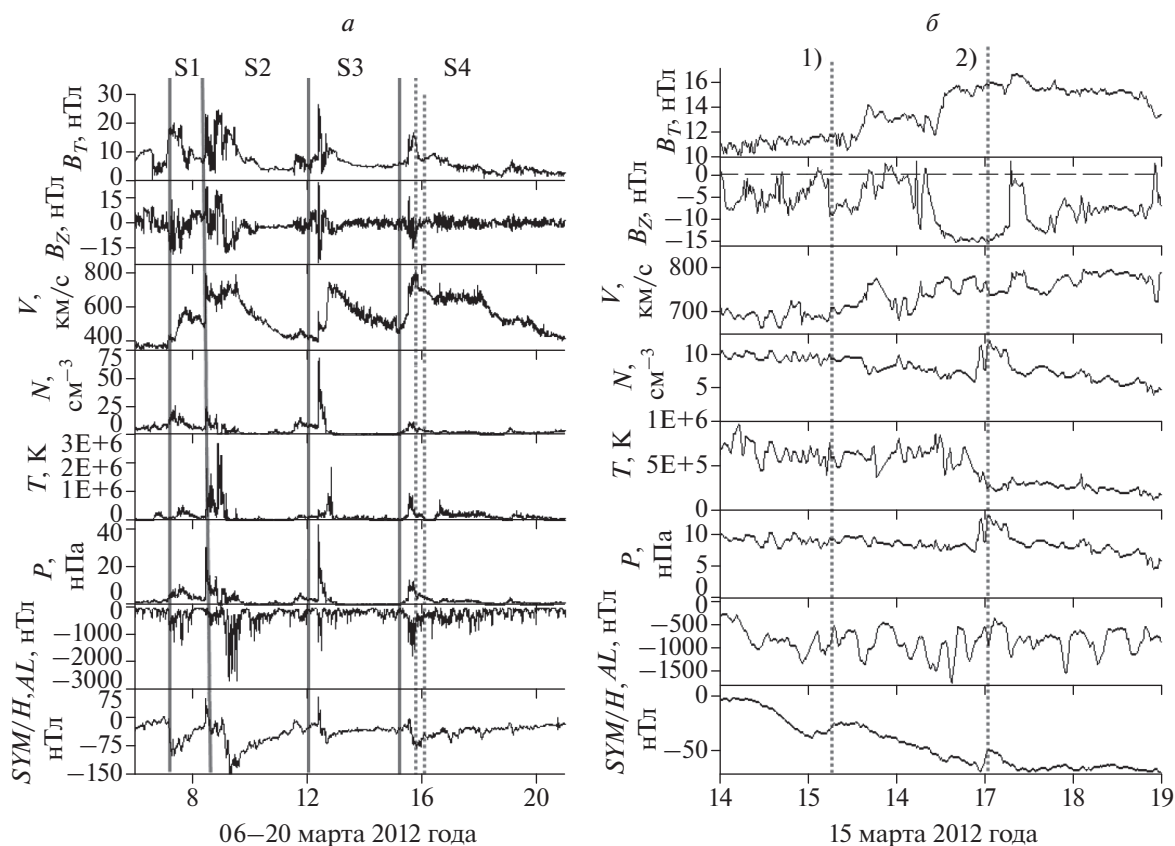
**Рис. 1.** Схема расположения измерительных устройств в проекте EURISGIC: кружками отмечены расположенные рядом обсерватории, измеряющие геомагнитное поле, и подстанции регистрации ГИТ. Стрелками и надписями указаны подстанции, данные которых используются в работе.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

#### 3.1. Событие 15 марта 2012 года

Событие сильной геомагнитной активности 7–17 марта 2012 г. можно отнести к наиболее возмущенным периодам восходящей фазы 24-го солнечного цикла. Это достаточно сложный случай, когда наблюдались четыре последовательных магнитных бури, которые были вызваны разными источниками в солнечном ветре – корональным выбросом массы (СМЕ) и высокоскоростным потоком (HSS – high speed stream), которые следовали друг за другом, но при этом частично накладывались друг на друга и перекрывались. Подробно развитие бурь и их источники в солнечном ветре были проанализированы в нескольких работах [Вальчук, 2013; Tsurutani et al., 2014; Maris et al., 2014]. На рисунке 2 показаны параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), сверху вниз: магнитуда ( $B_T$ ) межпланетного магнитного поля (ММП) и

Z-компонента ММП ( $B_Z$ ), скорость потока ( $V$ ), плотность, температура и динамическое давление ( $P$ ) солнечного ветра и геомагнитные индексы  $AL$  и  $SYM/H$ . Слева (2a) представлены данные для временного периода, охватывающего период всех четырех бурь – с 6 по 20 марта 2012 г., справа (2б) – с 14 до 19 UT 15 марта 2012 г. Границы всех магнитных бурь отмечены на рис. 2a вертикальными линиями и надписями S1, S2, S3, S4, соответственно. Событие S4 началось 15 марта в ~12:30 UT, когда в солнечном ветре была зарегистрирована первая ударная волна, которая предшествовала приходу коронального выброса массы, состоящего из области сжатой плазмы Sheath и магнитного облака (MC). Этот корональный выброс массы наблюдался на фоне высокоскоростного потока солнечного ветра (HSS) [Tsurutani et al., 2014]. В области Sheath была зарегистрирована сильная южная компонента ММП (~ -15 нТл), что привело к развитию магнитной бури ( $SYM/H = -80$  нТл).



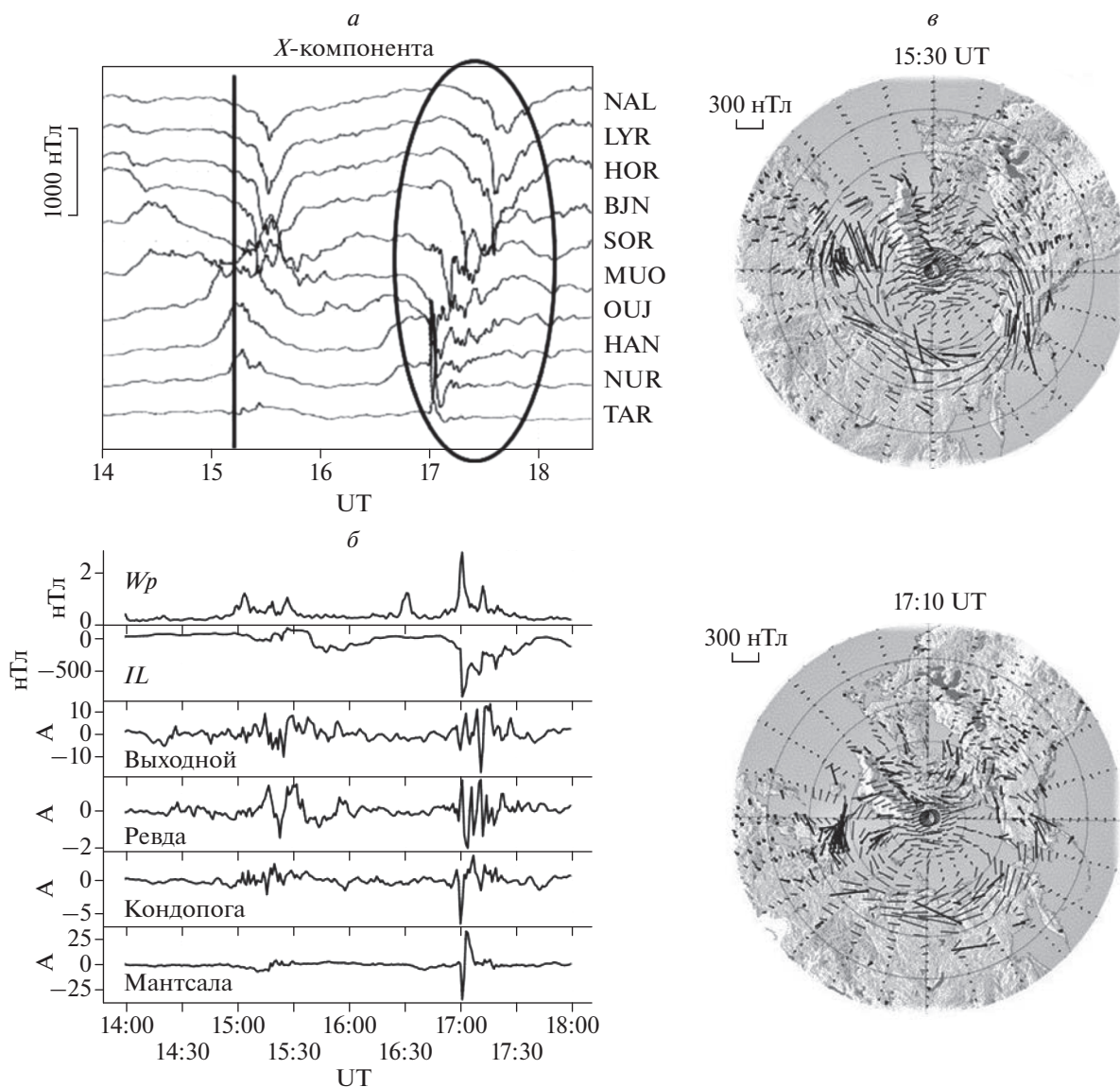
**Рис. 2.** Параметры солнечного ветра и ММП, а также геомагнитные индексы для периода с 12 UT 7 марта до 06 UT 20 марта 2012 года (а), для периода 14–19 UT 15 марта 2012 г. (б). Сверху вниз: магнитуда межпланетного магнитного поля ( $B_T$ ),  $B_Z$ -компонента ММП (в системе GSE), потоковая скорость ( $V$ ), плотность, температура и динамическое давление солнечного ветра ( $P$ ), геомагнитные индексы  $AL$  и  $SYM/H$ . Границы магнитных бурь отмечены вертикальными линиями и надписями S1, S2, S3, S4. Моменты начала суббурь отмечены вертикальными пунктирными линиями и надписями 1) и 2).

Кроме того, позднее в  $\sim 15:10$  UT в области Sheath наблюдалась вторая ударная волна, которая вызвала небольшие возмущения в вариациях магнитного поля на высокоширотных станциях и всплеск небольших по интенсивности ГИТ на станциях Мантсала и Выходной (подробнее см. ниже рис. 3 и 4). Далее, на главной фазе магнитной бури в  $\sim 17$  UT наблюдался локальный скачок в плотности и в динамическом давлении солнечного ветра. С этим скачком плотности, на наш взгляд, и может быть связано развитие интенсивной суббури в авроральной зоне около 17 UT и появление интенсивных ГИТ ( $>20$ – $30$  A) на станциях Мантсала и Выходной. Моменты наблюдения суббурь и ГИТ отмечены на рис. 2 вертикальными пунктирными линиями и надписями 1), 2).

Геомагнитные возмущения за период 14–18 UT 15 марта 2012 г. представлены на рис. 3. На верхних графиках (рис. 3а) приведены магнитограммы  $X$ -компоненты геомагнитного поля на цепочке станций Tartu – Ny Alesund (TAR-NAL) по сети IMAGE. Видно, что в этот период было два суббу-

ревых возмущения:  $\sim 15$  и  $\sim 17$  UT, во время которых цепочка IMAGE находилась в вечернем секторе ( $\sim 18$  и  $\sim 20$  LT). Первая суббуря наблюдалась только на высоких широтах, начало было в  $\sim 15:10$  UT на станции SOR ( $70.5^\circ$  N,  $22.2^\circ$  E) и далее суббуря распространилась до станции NAL ( $78.9^\circ$  N,  $11.9^\circ$  E), где наблюдались вариации магнитного поля  $\sim -400$  нТл. Вторая суббуря началась в  $\sim 16:55$  UT на станции HAN ( $62.2^\circ$  N,  $26.6^\circ$  E), далее возмущения распространялись к полюсу, постепенно появляясь на более высоких широтах, на станции SOR возмущения появились в  $\sim 17:05$  UT, а на станции NAL – в  $\sim 17:30$  UT. Справа, на рис. 3в, показаны карты пространственного распределения магнитных векторов, полученных по глобальной системе SuperMAG для двух моментов времени 15:30 и 17:10 UT, магнитные вектора повернуты на  $90^\circ$  по часовой стрелке, чтобы показать направление ионосферных эквивалентных электрических токов, полночь – внизу рисунка, полдень – сверху. По карте сферического анализа векторов магнитного поля SuperMAG в 15:30 UT



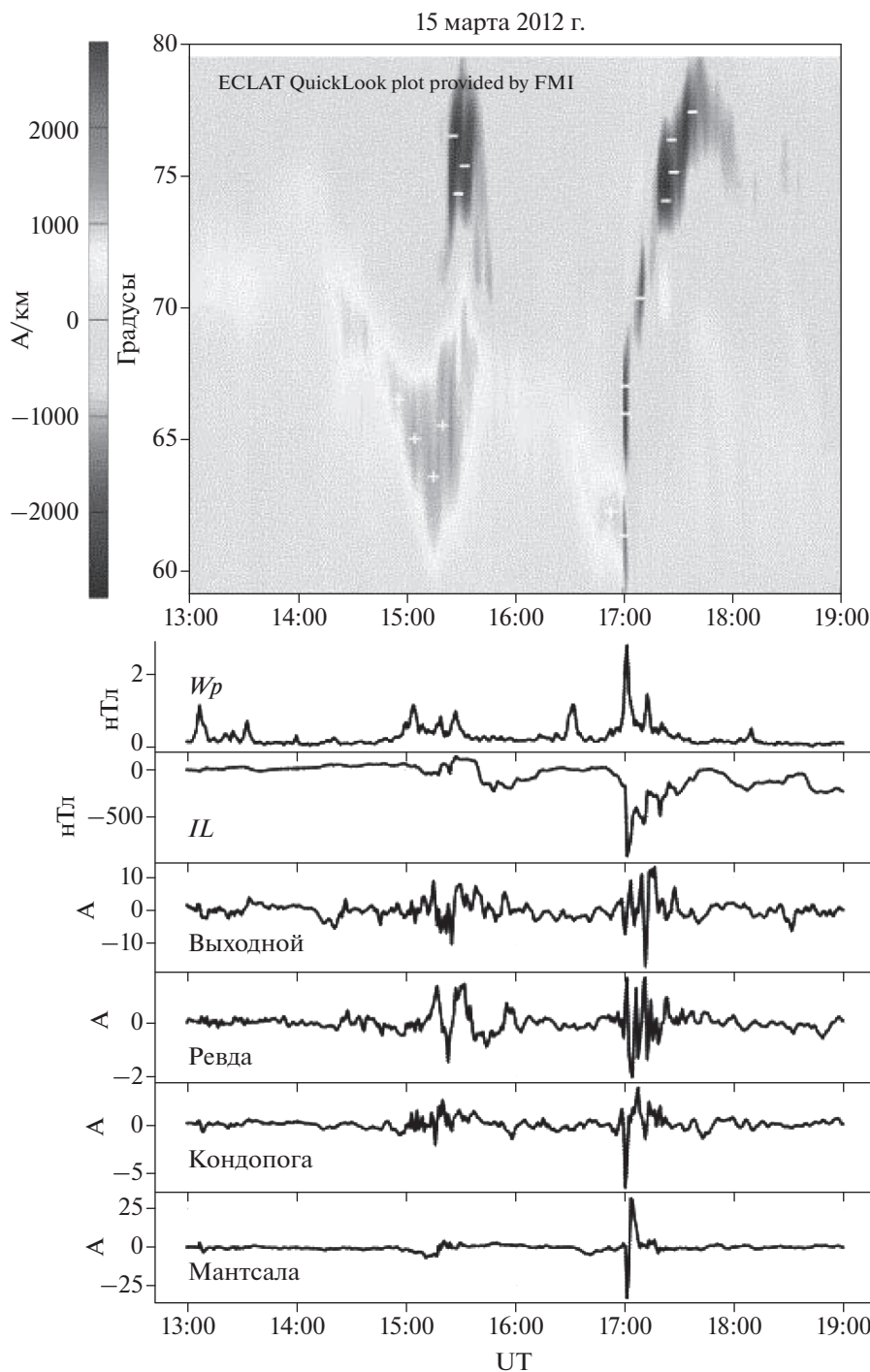


**Рис. 3.** Наблюдения геомагнитных возмущений и регистраций ГИТ с 14 до 18 UT 15 марта 2012 года: вариации X-компоненты магнитного поля на станциях IMAGE – (а),  $IL$  и  $W_p$  геомагнитные индексы и ГИТы на станциях Мантсала, Кондопога, Ревда и Выходной – (б), карты пространственного распределения векторов магнитного поля, полученные по сети SuperMAG – (в). Магнитные вектора повернуты на  $90^\circ$  и указывают направление эквивалентных электрических токов. Карты построены для двух моментов времени: 15:30 и 17:10 UT, полдень вверху карты, полночь – внизу, 06 MLT – справа и 18 MLT – слева.

видно, что на меридиане IMAGE западный электроджет наблюдался в вечернем секторе ( $\sim 18$  MLT) на геомагнитных широтах выше  $70^\circ$  MLAT, а на более низких широтах был зарегистрирован восточный электроджет. В то время как во время второй суббури в 17:10 UT сильный западный ток был зарегистрирован над Кольским полуостровом и Шпицбергенем, суббуревые возмущения наблюдались от субавроральных до высоких широт.

На рисунке 3б на верхних графиках представлены геомагнитные индексы  $IL$  и  $W_p$ , на нижних графиках – данные регистрации ГИТ для периода

с 14 до 18 UT 15 марта 2012 г. на станциях Мантсала, Кондопога, Ревда и Выходной. Геомагнитные возмущения во время первой суббури-соответствовали небольшим вариациям в  $W_p$ -индексе и фактически не отразились в  $IL$ -индексе. На станции Мантсала в это время наблюдались незначительные ГИТ интенсивностью  $\sim 5$  А, но на станции Выходной токи были заметнее ( $>10$  А). Это может быть связано с тем, что первая суббурия наблюдалась только на высоких широтах. Для второй суббури в  $\sim 17$  UT видны резкие сильные всплески в  $IL$ - ( $> -1000$  нТл) и  $W_p$  ( $>2$ ) индексах,



**Рис. 4.** Широтный профиль развития западного и восточного электроджетов, построенный по системе MIRACLE, с 13 до 19 UT 15 марта 2012 г. (сверху). Западный электроджет показан темно-серым цветом и символами “-”, восточный – светло-серым цветом и символами “+”. Геомагнитные индексы  $IL$  и  $Wp$  и ГИТы на станциях Мантсала, Кондопога, Ревда и Выходной с 13 до 19 UT 15 марта 2012 г. (снизу).

далее в  $\sim 17:10$  и  $\sim 17:20$  UT наблюдались два минимума в  $IL$  и один максимум в  $Wp$ -индексе, соответствующие распространению суббури на высокие широты, которое происходило скачками (подробнее см. рис. 4). Данные регистрации ГИТ на

станциях Мантсала, Кондопога, Ревда и Выходной показывают, что момент начала второй суббури  $\sim 17$  UT совпадает с появлением интенсивного ГИТ на ст. Мантсала ( $\sim 39$  А). В это же время появляются наведенные токи в Кондопоге ( $\sim 7$  А),

на ст. Ревда ( $\sim 2$  А) и отмечается начало довольно интенсивных ГИТ на ст. Выходной, максимум которых наблюдался в  $\sim 17:10$  UT ( $\sim 18$  А), когда суббуравой западный электроджет достиг широты станции.

Надо отметить, что во второй суббуре движение западного электроджета к полюсу происходило неравномерно, скачками, это хорошо видно на рис. 4, где представлен широтный профиль западного и восточного электроджетов, рассчитанный по системе MIRACLE с 13 до 19 UT 15 марта 2012 года. Западный электроджет показан темно-серым цветом и символами “–”, восточный – светло-серым цветом и символами “+”. Во время первой суббури в  $\sim 15$  UT западный электроджет развивался только на широтах  $71^\circ$ – $79^\circ$  географической широты. Из нижних графиков следует, что значимые ГИТ ( $>10$  А) появились только на станции Выходной, которая располагалась близко к широте начала суббури, в то время как на подстанциях, расположенных на более низких широтах – Мантсала, Кондопога и Ревда, – наблюдались слабые токи ( $<5$  А).

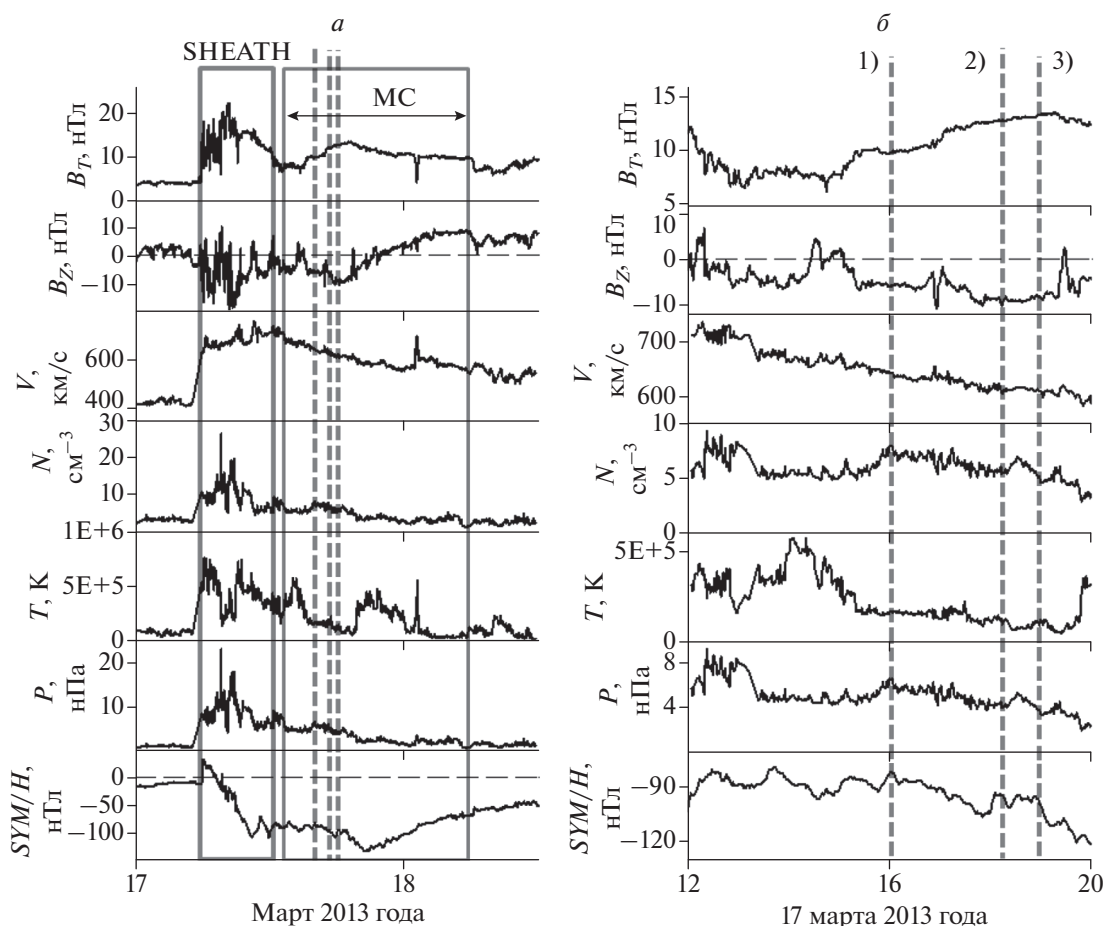
Для второй суббури видно, что в  $\sim 17$  UT западный электроджет начал движение к северу от  $\sim 60^\circ$  географической широты (станция HAN), в  $17:10$  UT он достиг широты  $\sim 69^\circ$ – $70^\circ$  (SOR) и далее произошел скачок электроджета на широты  $74^\circ$ – $78^\circ$  (BJN-NAL). Из графиков на нижней панели видно, что профили распространения к северу ГИТ и западного электроджета практически совпадают. Интенсивный ГИТ появился на самой низкоширотной подстанции Мантсала одновременно с началом суббури в 17 UT, небольшие токи были зарегистрированы также в Кондопоге и Ревде, на подстанции Выходной максимальный ГИТ появился немного позже  $\sim 17:10$  UT, когда на широте станции появился суббуравой западный электроджет.

### 3.2. Событие 17 марта 2013 года

Второе событие появления интенсивных ГИТ на Карело-Кольской ЛЭП было зарегистрировано 17 марта 2013 года, в так называемый “день Святого Патрика”. В этот день произошла умеренная магнитная буря (SYM/H  $\sim -140$  нТл), связанная с приходом к Земле коронального выброса массы (СМЕ). На рис. 5 показаны параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), на левой панели – для периода с 00 UT 17 марта по 12 UT 18 марта (рис. 5а), на правой панели – с 12 до 20 UT 17 марта 2013 г. (рис. 5б). Формат рис. 5 подобен формату рис. 2, исключая график AL-индекса. Магнитное облако (МС) и область сжатой плазмы (Sheath) обозначены надписями, а их границы – прямоугольниками и горизонтальной стрелкой. В корональном выбросе массы наблюдались два продолжительных пе-

риода отрицательных значений  $B_z$ -компоненты ММП – во время Sheath и во время МС. В результате магнитная буря развивалась как типичная двухступенчатая буря [Tsurutani et al., 1988; Kamide et al., 1998]. На фоне этой магнитной бури 17 марта наблюдались три суббури, моменты появления суббурь и регистрации ГИТ показаны вертикальными пунктирными линиями и надписями “1”, “2”, “3”. Видно, что все три события произошли на главной фазе бури, во время прохождения магнитного облака солнечного ветра. Перед их появлением наблюдался длительный период отрицательных значений  $B_z$ -компоненты ММП ( $\sim -10$  нТл), скорость солнечного ветра была высокая ( $\sim 600$  км/с), плотность также была повышена ( $\sim 8$  см $^{-3}$ ).

Геомагнитные и авроральные возмущения и индуцированные токи (ГИТ) с 15 по 21 UT 17 марта 2013 г. представлены на рис. 6. Формат рис. 6 подобен рис. 3, но добавлен рисунок, демонстрирующий развитие синий, так как в это время были наблюдения камеры всего неба в Апатитах (рис. 6з). На графиках рис. 6а приведены магнитограммы X-компоненты геомагнитного поля на цепочке станций TAR-NAL сети IMAGE. Видно, что в этот период было три суббури:  $\sim 15:50$ ,  $\sim 18$  и  $\sim 19:15$  UT, во время которых магнитометры IMAGE располагались в вечернем секторе ( $\sim 18:50$ ,  $\sim 21$  и  $\sim 22:15$  MLT). Моменты суббурь указаны овалами и надписями “1”, “2”, “3”. На нижних графиках показаны геомагнитные индексы  $IL$  и  $Wp$  и данные регистрации ГИТ (рис. 6б), слева – карты SuperMAG пространственного распределения магнитных векторов для трех моментов времени 16:10, 18:44 и 19:30 UT, близких к моментам максимального развития суббурь (рис. 6в). Магнитные вектора на картах повернуты на  $90^\circ$  и указывают направление ионосферных эквивалентных электрических токов. Как следует из первой карты в 16:10 UT цепочка IMAGE располагалась в вечернем секторе  $\sim 18$ – $19$  MLT, где обычно наблюдается разрыв Харанга и токи разного направления (западный и восточный электроджеты) очень близко расположены друг от друга [Harang, 1946; Kunkel et al., 1986; Despirak et al., 2021]. Видно, что в 16:10 UT западный электроджет располагался на широтах  $> 67^\circ$ – $68^\circ$  географической широты, ниже наблюдался поворот магнитных векторов и ток восточного направления. Согласно магнитограммам, отрицательные бухты начались на станции PEL и распространились до станции NAL, при этом наиболее сильные возмущения ( $\sim 1000$  нТл) были на станциях SOR-BJN. А на более низких широтах (OUJ-TAR) наблюдались положительные бухты. Сравнивая рисунки 6а и 6б, можно заметить, что появление ГИТ на рассматриваемых подстанциях около 16 UT соответствует пространственному расположению суббуравой западного электроджета: интенсивный ток



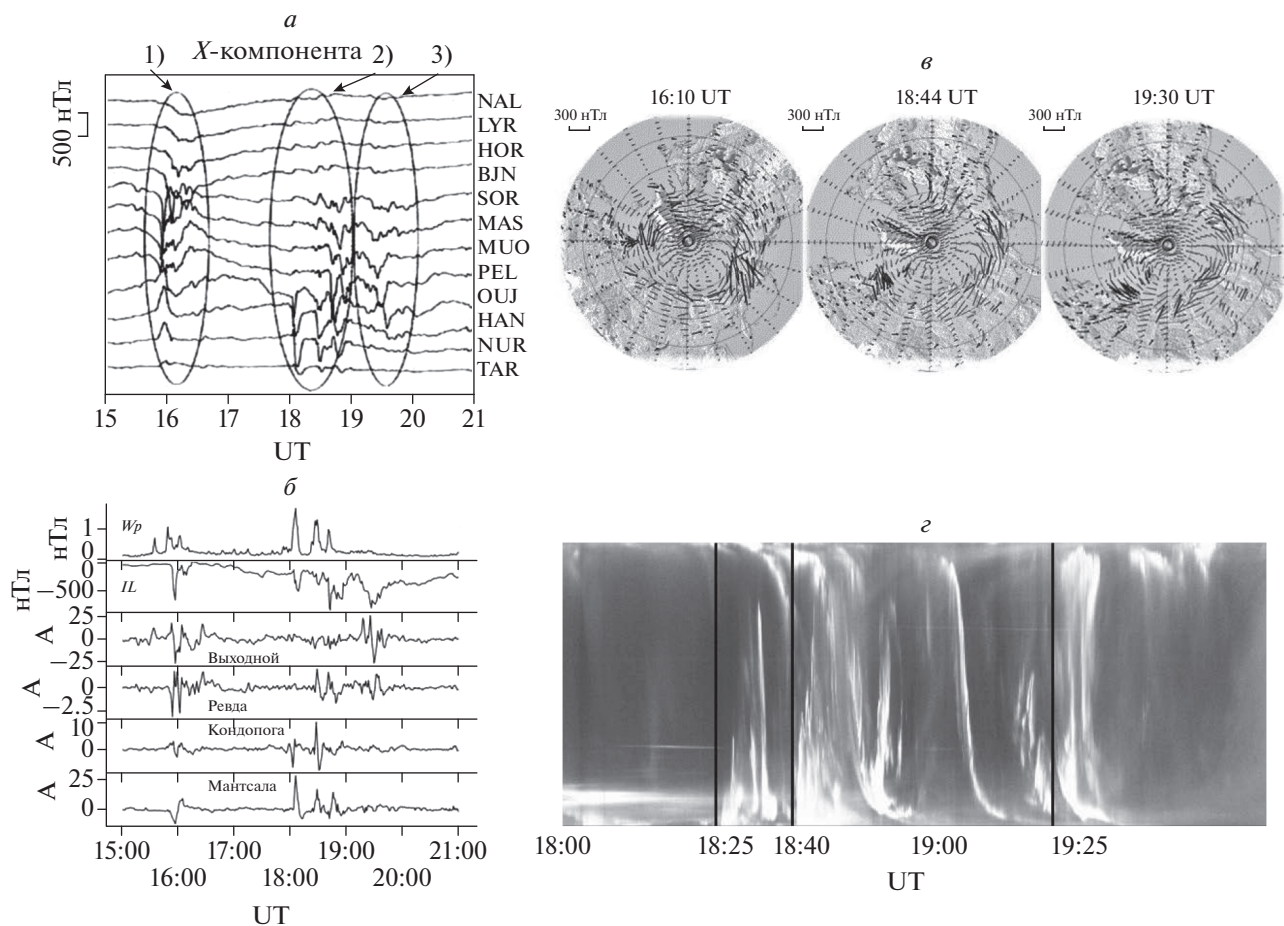
**Рис. 5.** Параметры солнечного ветра и ММП, а также геомагнитные индексы для периода с 00 UT 17 марта до 12 UT 18 марта 2013 г. — (а) и для периода 12–20 UT 17 марта 2013 г. — (б). Формат рис. 5 подобен рис. 2. Границы магнитного облака (MC) и области SHEATH обозначены прямоугольниками и горизонтальными стрелками, моменты начала суббурь отмечены вертикальными пунктирными линиями.

наблюдался на подстанции Выходной (~27 А), где были максимальные возмущения магнитного поля, на более низких широтах ГИТ появились в Ревде (~3 А), Кондопоге (~4 А) и Мантсала (~10 А).

Вторая суббуря началась в ~18 UT на станции NUR и состояла из трех активизаций — в 18:00, 18:20 и 18:40 UT, которые на магнитограммах видны как три отрицательные бухты (рис. 6а) и как три минимума (максимума) в индексах  $IL$  ( $Wp$ ) (рис. 6б). После начала суббури электроджет перемещался к полюсу, первые три активизации видны на станциях NUR-OUJ, далее в ~18:20 UT возмущения появились на станциях PEL-SOR. Вторая и третья активизации суббури хорошо просматриваются и в развитии сияний (рис. 6з), моменты их отмечены горизонтальными линиями на кеограмме камеры всего неба в Апатитах. Как видно из рис. 6б, развитие ГИТ в ~18–19 UT соответствует развитию суббурного западного электроджета: в ~18 UT довольно интенсивные токи появились на станции Мантсала и Кондопо-

га, при этом в Мантсала наблюдались три всплеска ГИТ интенсивностью ~32 А, 20 А и 18 А, соответствующие трем активизациям суббури в 18:00, 18:20 и 18:40 UT, а в Кондопоге — два всплеска интенсивностью ~10 и 11 А, соответствующие первой и второй активизациям суббури. В Ревде в 18:20 и 18:40 UT были зарегистрированы два всплеска ГИТ интенсивностью ~3 А, соответствующие второй и третьей активизации. В это время на подстанции Выходной токи были незначительны, но позже, в ~19:30 UT, появился довольно интенсивный наведенный ток ~27 А. Этот момент времени соответствует времени развития третьей суббури. Как следует из рис. 6а, в ~19:15 UT начались возмущения на станциях OUJ-SOR интенсивностью ~–500 нТл, в момент максимального развития третьей суббури были зарегистрированы сильные ГИТ на станции Выходной. Отметим, что третья суббуря была зарегистрирована и камерой всего неба в Апатитах, на рис. 6з отмечен брейкап в сияниях. Карты распределения



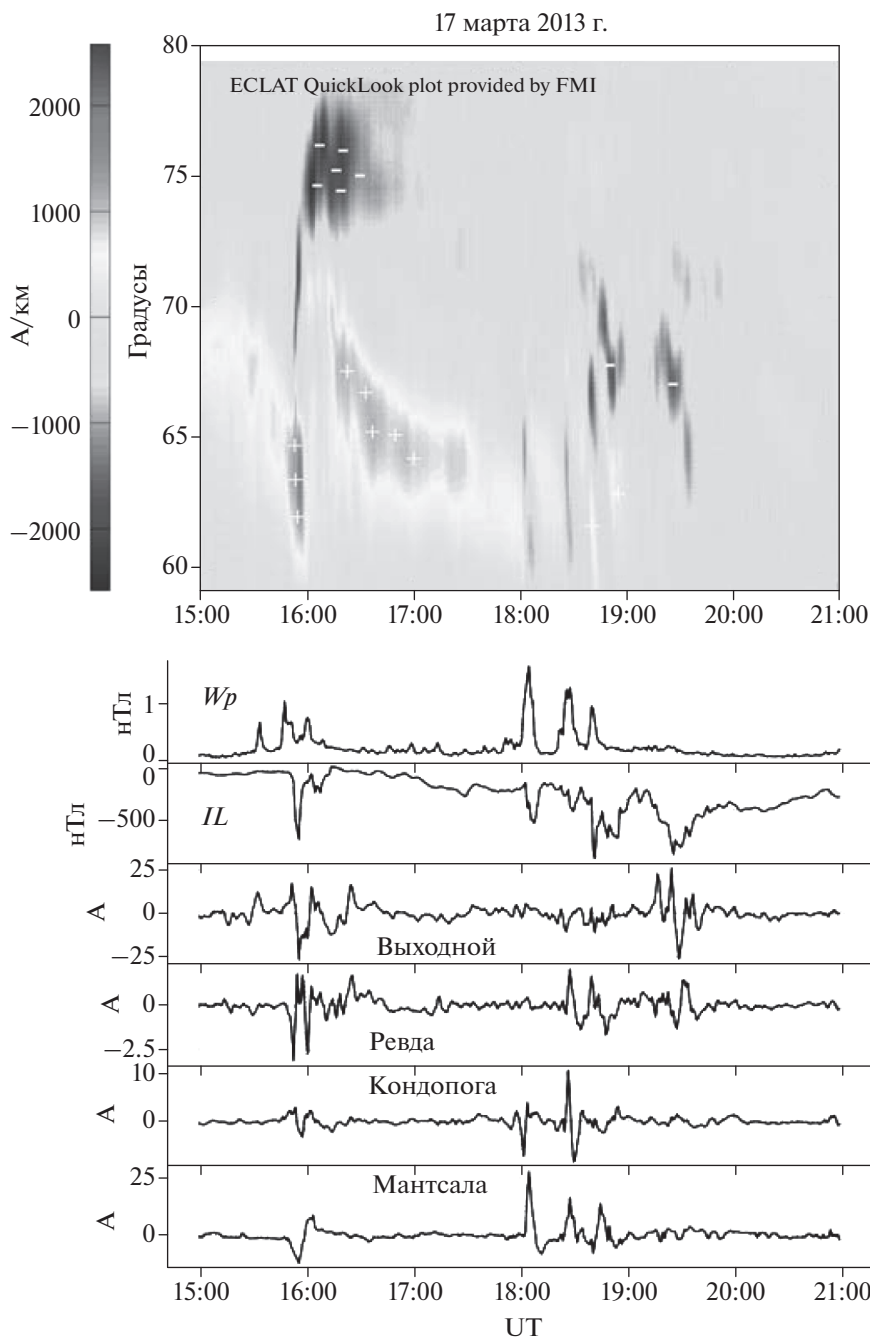


**Рис. 6.** Наблюдения геомагнитных возмущений и регистраций ГИТ с 15 до 21 UT 17 марта 2013 года. Вариации X-компоненты магнитного поля на станциях IMAGE – (а). Геомагнитные индексы *IL* и *Wp* и ГИТы на станциях Мантсала, Кондопога, Ревда и Выходной – (б). Карты пространственного распределения векторов магнитного поля, полученные по сети SuperMAG для трех моментов времени: 16:10, 18:44 и 19:30 UT – (в) (магнитные вектора повернуты на 90° и указывают направление эквивалентных электрических токов). Кеограмма сияний в Апатитах с 18 до 20 UT – (г), вертикальными линиями отмечены моменты суббуревых активизаций.

магнитных векторов сети SuperMAG показывают, что магнитные возмущения наблюдались как раз над Кольским полуостровом.

Более подробно движение западного электроджета во время суббури показано на рис. 7, где представлен широтный профиль западного и восточного электроджетов, рассчитанный по системе MIRACLE с 15 до 21 UT 17 марта 2013 г. Формат рис. 7 подобен формату рис. 4. На верхнем рисунке темно-серым цветом и символами “\_” отмечен западный электроджет, по вертикальной оси показана географическая широта. Видно, что во время первой суббури в ~16 UT наблюдался быстрый бросок к полюсу западного электроджета от широты ~68° до ~73°, далее развитие суббури происходило на широтах 73°–78°. Соответственно, интенсивные ГИТ появились на подстанциях Выходной и Ревда во время движения электроджета на более высокие широты, а на более низко-

широтных подстанциях Кондопога и Мантсала регистрировались незначительные ГИТ. Вторая суббуря началась в ~18 UT на широте ~60°, на широтном профиле хорошо видны три активизации суббури в 18:00, 18:20 и 18:40 UT, во время первых двух активизаций западный электроджет наблюдался на широтах 60°–65°, а во время третьей произошел бросок электроджета к полюсу до широты ~71°. Далее, в 19:15 UT началась третья суббуря, которая развивалась на широтах 66°–69°. По нижним графикам видно, что ГИТ развивались подобно пространственно-временной динамике западного электроджета. В ~16 UT интенсивные ГИТ были на станциях Ревда и Выходной, во время второй суббури все три активизации электроджета отразились в ГИТ на ст. Мантсала, две первых активизации – на ст. Кондопога, вторая и третья активизация – в Ревде. На ст. Выходной ГИТ появился во время третьей суббури.



**Рис. 7.** Широтный профиль развития западного и восточного электроджетов, построенный по системе MIRACLE, с 15 до 21 UT 17 марта 2013 г. (сверху). Геомагнитные индексы  $IL$  и  $Wp$  и ГИТы на станциях Мантсала, Кондопога, Ревда и Выходной (снизу). Формат рис. 7 подобен формату рис. 4.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Проведен анализ двух событий появления интенсивных ГИТ на разных системах регистраций — на Карело-Кольской системе на Северо-Западе России и на финском газопроводе вблизи Мантсала. Оба рассматриваемых события наблюдались во время магнитных бурь, вызванных приходом к Земле межпланетных корональных выбросов

массы (ICME — interplanetary coronal mass ejection). Отметим, что появление геомагнитно-индуцированных токов на подстанциях Северо-Запада России исследуется с 2011 года и было найдено, что интенсивные ГИТ связаны, в основном, с корональными выбросами массы [Сахаров и др., 2019]. Этот же результат был получен и для ГИТ, зарегистрированных на газопроводе Мантсала,

было показано, что 91% дней с пиками ГИТ  $> 10$  А связаны с ICME [Huttunen et al., 2008]. При анализе большого периода данных с 1999 по 2019 годы было обнаружено, что среди разных типов солнечного ветра межпланетные корональные выбросы массы вызывают ~97% пиков ГИТ  $> 10$  А, при этом с Sheath и MC связаны ~51 и ~44% всех пиков, соответственно [Tsurutani et al., 2021; Haira, 2022]. Как известно, с приходом ICME связано появление очень интенсивных магнитных бурь [Echer et al., 2008], и, следовательно, большинство ГИТ может также наблюдаться во время интенсивных бурь. Как оказалось, ~67% всех пиков ГИТ  $> 10$  А на станции Мантсала наблюдались во время супербурь ( $SUM/H > -250$  нТл), при этом подавляющее большинство их приходилось на главную фазу бури [Haira, 2022]. И оба рассматриваемых в нашей статье события появления интенсивных ГИТ также были зарегистрированы на главных фазах магнитных бурь 15 марта 2012 и 17 марта 2013 г. (рисунки 2 и 5).

Кроме того, известно, что на возникновение ГИТ могут влиять и другие, более локальные возмущения магнитного поля, связанные с магнитосферными суббуриями, импульсами динамического давления солнечного ветра, магнитными пульсациями, омега структурами в сияниях и т.д. [Oliveira et al., 2017; Воробьев и др., 2019; Kozugeva et al., 2020; Apatenkov et al., 2019]. Одним из важных источников ГИТ в авроральной зоне является усиление и движение электроджетов во время взрывной фазы суббури. В нашей работе мы использовали данные двух разных систем регистрации ГИТ, что позволило проследить их динамику от субавроральных до высоких широт (с  $60.6^\circ$  до  $69^\circ$  N географической широты) и сопоставить с широтным развитием суббури. Как видно из рисунков 3–4 и 6–7 появление ГИТ на подстанциях, расположенных на разных широтах, подобно широтному профилю западного электроджета. Для случаев, когда суббурия развивалась только в высоких широтах, в ~15:30 UT 15 марта 2012 г. и в ~16 UT 17 марта 2013 г., ГИТ появились только на высокоширотных подстанциях Ревда и Выходной. Для суббури ~17 UT 15 марта 2012 г. движение электроджета происходило по всему широтному профилю, от субавроральных до высоких широт, и, соответственно, ГИТ появились на всех подстанциях, начиная от Мантсала, и постепенно распространяясь к более высокоширотным станциям, с некоторой временной задержкой (рис. 4). Наиболее ярко подобие в широтном профиле появления ГИТ и развития западного электроджета проявилось для суббури 17 марта 2013 г. в ~18 UT. Это было сложное событие, состоящее из 3 суббуревых активизаций, когда геомагнитные возмущения начались в Мантсала и распространялись в более высокие широты (рис. 6). И эта тонкая пространственно-временная структура суббури

проявилась в развитии ГИТ: все три активизации появились как три пика ГИТ (~32 А, 20 А и 18 А) на ст. Мантсала, далее первая и вторая активизации видны как пики ГИТ на ст. Кондопога (~10 А и 11 А), вторая и третья активизация как пики ГИТ (~3 А) в Ревде. И чуть позже ГИТ (~27 А) появился на ст. Выходной (рисунки 6 и 7). Мы полагаем, что при исследовании и моделировании источников ГИТ надо учитывать и тот факт, что суббуревая активность связана не только с усилением интенсивности крупномасштабного азимутального западного электроджета [Белаховский и др., 2018], но имеет и другие более мелкомасштабные меридиональные проявления, такие как движение к полюсу западного электроджета [Kisabeth and Rostoker, 1974; Pudovkin et al., 1995], которое происходит “скачками” во время взрывной фазы суббури [Wiens and Rostoker, 1975]. К тому же взрывная фаза суббури может состоять из нескольких активизаций [Сергеев и Яхнин, 1979], как это и наблюдалось во время суббури ~18 UT 17 марта 2013 года.

В обоих рассматриваемых событиях, 15 марта 2012 г. и 17 марта 2013 г., прослеживается также хорошая зависимость между появлением ГИТ и  $IL$ -индексом, который характеризует интенсивность западного электроджета на станциях IMAGE (по аналогии с  $AL$ -индексом). Надо отметить, что событие 17 марта 2013 года ранее рассматривалось в работах [Белаховский и др., 2018; Belakhovskiy et al., 2019]. Однако авторы не нашли корреляции ГИТ с  $AE$ -индексом, возможно, потому что они использовали часовые значения  $AE$ -индекса, а это недостаточно эффективно в случае суббурь, не позволяет выявить тонкую структуру суббури. Кроме того, в случае такого сложного события как суббурия 18 UT 17 марта 2013 года лучше подходит  $IL$ -индекс, отражающий возмущения именно на меридиане IMAGE, что позволяет исключить влияние суббуревой активности на других долготях.

Показана также хорошая зависимость между появлением ГИТ и  $Wp$ -индексом, который может быть использован как индикатор начала суббури [Nose et al., 2012] (рисунки 3–4 и 6–7). Однако, надо отметить, что эта зависимость хорошо прослеживается для станций Мантсала и Кондопога, а на станциях Ревда и Выходной может не проявляться, как, например, для случая суббури ~19:30 UT 17 марта 2013 года. На наш взгляд, это происходит потому, что  $Wp$ -индекс рассчитывается по низкоширотным станциям и возмущения на более высоких широтах могут не отражаться в его вариациях (рисунки 6–7).

## 5. ВЫВОДЫ

1) Развитие ГИТ на меридиональном профиле (от Мантсала до Выходного) происходило в соот-

ветствии с тонкой пространственно-временной структурой суббури. Появление ГИТ на разных широтах подобно движению к полюсу западного электроджета, появлению и распространению к полюсу суббуревых активизаций.

2) Установлена связь между появлением ГИТ и увеличением геомагнитных индексов: *IL*-индексом, характеризующем интенсивность западного электроджета на меридиане IMAGE, и *Wp*-индексом, определяющим начало и волновую активность суббури.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность создателям базы данных OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>), каталога крупномасштабных типов солнечного ветра <ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog>, баз данных SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>), IMAGE (<http://space.fmi.fi/image/>) за возможность их использования в работе.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа Дэспирак И.В., Любича А.А. и Сецко П.В. выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований и Национального научного фонда Болгарии (проект № 20-55-18003). Работа Валева Д. выполнена при поддержке проекта Национального научного фонда Болгарии (проект № КП-06-Русия/15). Работа Сахарова Я.А. и Селиванова В.Н. по регистрации ГИТ выполнена при поддержке проекта Российского научного фонда № 22-29-00413.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н.* Характеристики variability геомагнитного поля для изучения воздействия магнитных бурь и суббурь на электроэнергетические системы // *Физика Земли*. № 1. С. 173–185. 2018.
- *Вальчук Т.Е.* Солнечный ветер и магнитные бури 24 цикла солнечной активности // *Астрономический циркуляр*. № 1585. ISSN 0236-2457. 2013.
- *Воробьев А.В., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н.* Статистические взаимосвязи вариаций геомагнитного поля, аврорального электроджета и геоиндуцированных токов. // *Солнечно-земная физика*. Т. 5. № 1. С. 48–58. 2019. <https://doi.org/10.12737/szf-51201905>
- *Воробьев В.Г., Сахаров Я.А., Ягодкина О.И., Петрукович А.А., Селиванов В.Н.* Геоиндуцированные токи и их связь с положением западной электроструи и границами авроральных высыпаний // *Труды Кольского научного центра РАН*. Т. 4. С. 16–28. 2018. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.5.16-28>
- *Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю.* Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // *Космич. исслед.* Т. 47. № 2. С. 99–113. 2009.
- *Сахаров Я.А., Данилин А.Н., Остафийчук Р.М.* Регистрация ГИЦ в энергосистемах Кольского полуострова / *Труды 7-го Междунар. симп. по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии*. г. Санкт-Петербург, 26–29 июня 2007 г. СПб. С. 291–293. 2007. IEEE Cat.N. 07EX1804C, ISBN: 1–4244–1270–6
- *Сахаров Я.А., Катькалов Ю.В., Селиванов В.Н., Вильянен А.* Регистрация геоиндуцированных токов в региональной энергосистеме / *Практические аспекты гелиогеофизики, Материалы специальной секции “Практические аспекты науки космической погоды” 11-й ежегодной конференции “Физика плазмы в солнечной системе”*. 17 февраля 2016 г. Москва. ИКИ. С. 134–145. 2016.
- *Сахаров Я.А., Селиванов В.Н., Билин В.А., Николаев В.Г.* Экстремальные величины геоиндуцированных токов в региональной энергосистеме / *Proc. XLII Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”*. Апатиты. 11–15 марта 2019. С. 53–56. 2019. <https://doi.org/10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.53-56>
- *Сергеев В.А., Яхнин А.Г.* Соответствие признаков взрывной фазы суббури // *Геомагнитные исследования*. М.: Сов. Радио. Вып. 24. С. 78–89. 1979.
- *Belakhovsky V., Pilipenko V., Engebretson M., Sakharov Y., Selivanov V.* Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines // *J. Space Weather Clim.* V. 9. A. 18. 2019. <https://doi.org/10.1051/swsc/2019015>
- *Clilverd M.A., Rodger C.J., Brundell J.B., Dalzell M., Martin I., MacManus D.H., Thomson N.R., Petersen T., Obana Y.* Long-lasting geomagnetically induced currents and harmonic distortion observed in New Zealand during the 7–8 September 2017 disturbed period // *Space Weather* V.16. P. 704–717. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018SW001822>
- *Gjerloev J.W.* A global ground-based magnetometer initiative // *EOS Trans. AGU*. V. 90. № 27. P. 230–231. 2009. <https://doi.org/10.1029/2009EO270002>
- *Davis T.N., Sugiura M.* Auroral electrojet activity index *AE* and its universal time variations // *J. Geophys. Res.* V. 71. № 3. P. 785–801. 1966. <https://doi.org/10.1029/JZ071i003p00785>
- *Despirak I.V., Kozelova T.V., Kozelov B.V., Lubchich A.A.* Observations of substorm activity from the data of MAIN camera system and THD satellite in the plasma sheet // *Proceedings of 44th Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”*, Apatity, 15–19 March 2021. P. 16–19. <https://doi.org/10.51981/2588-0039.2021.44.003>
- *Echer E., Gonzalez W.D., Tsurutani B.T.* Interplanetary conditions leading to superintense geomagnetic storms ( $Dst \leq -250$  nT) during solar cycle 23 // *Geophys. Res. Lett.* V. 35. L06S03. 2008. <https://doi.org/10.1029/2007GL031755>
- *Haira R.* Intense geomagnetically induced currents (GICs): association with solar and geomagnetic activities // *Solar Physics*. V. 297. A. 14. 2022. <https://doi.org/10.1007/s11207-021-01945-8>
- *Harang L.* The mean field of disturbance of polar geomagnetic storms // *Terr. Magn. Atmos. Electr.* V. 51. № 3.

- P. 353–380. 1946.  
<https://doi.org/10.1029/TE051i003p00353>
- *Huttunen K.E.J., Kilpua S.P., Pulkkinen A., Viljanen A., Tanskanen E.* Solar wind drivers of large geomagnetically induced currents during the solar cycle 23 // *Space Weather*. V. 6. № 10. S10002. 2008.  
<https://doi.org/10.1029/2007SW000374>
- *Kamide Y., Yokoyama N., Gonzalez W., Tsurutani B.T., Daglis I.A., Brekke A., Masuda S.* Two-step development of geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 103. № A4. P. 6917–6921. 1998.  
<https://doi.org/10.1029/97JA03337>
- *Kisabeth J.L., Rostoker G.* The expansive phase of magnetospheric substorms. I. Development of the auroral electrojets and auroral arcs configuration during substorm // *J. Geophys. Res.* V. 79. P. 972–984. 1974.  
<https://doi.org/10.1029/JA079i007p00972>
- *Kozyreva O., Pilipenko V., Krasnoperov R., Baddeley L., Sakharov Y., Dobrovolsky M.* Fine structure of substorm and geomagnetically induced currents // *Annals of Geophysics*. 2020. V. 63. № 2. GM219.  
<https://doi.org/10.4401/ag-8198>
- *Kunkel T., Untiedt J., Baumjohann W., Greenwald R.* Electric fields and currents at the Harang discontinuity: a case study // *Journal of Geophysics*. V. 59. № 1. P. 73–86. 1986.
- *Lakhina G.S., Hajra R., Tsurutani B.T.* Geomagnetically induced current / *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics, Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Ed. H.K. Gupta. Springer Nature Switzerland AG. 2020.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-10475-7\\_245-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-10475-7_245-1)
- *Maris Muntean G., Besliu-Ionescu D., Georgieva K., Kirov B.* Analysis of the Geomagnetic Activity During the SC 24 Maximum Phase / 6th Workshop “Solar influences on the magnetosphere, ionosphere and atmosphere”, 26–30 May 2014, Sunny Beach, Bulgaria, Abstracts Book. P. 10. 2014. <http://ws-sozopol.stil.bas.bg/>
- *Newell P.T., Gjerloev J.W.* Substorm and magnetosphere characteristic scales inferred from the SuperMAG auroral electrojet indices // *J. Geophys. Res.* V. 116. № A12. A12232. 2011.  
<https://doi.org/10.1029/2011JA016936>
- *Nosé M., Iyemori T., Wang L. et al.* Wp index: A new substorm index derived from high-resolution geomagnetic field data at low latitude // *Space Weather*. V. 10. № 8. S08002. 2012.  
<https://doi.org/10.1029/2012SW000785>
- *Oliveira D.M., Ngwira C.M.* Geomagnetically Induced Currents: Principles // *Braz. J. Phys.* V. 47. P. 552–560. 2017.  
<https://doi.org/10.1007/s13538-017-0523-y>
- *Pudovkin M.I., Semenov V.S., Kotikov A.L., Shishkina E.M.* Dynamics of auroral electrojets and energetics of substorm // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 57. № 2. P. 187–192. 1995.  
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(93\)E0033-6](https://doi.org/10.1016/0021-9169(93)E0033-6)
- *Pulkkinen A., Lindahl S., Viljanen A., Pirjola R.* Geomagnetic storm of 29–31 October 2003: Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system // *Space Weather*. V. 3. № 8. S08C03. 2005.  
<https://doi.org/10.1029/2004SW000123>
- *Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Tang F., Akasofu S.-I., Smith E.J.* Solar wind southward Bz features responsible for major magnetic storms of 1978–1979 // *J. Geophys. Res.* V. 93. № A8. P. 8519–8531. 1988.  
<https://doi.org/10.1029/JA093iA08p08519>
- *Tsurutani B.T., Echer E., Shibata K., Verkhoglyadova O.P., Mannucci A.J., Gonzalez W.D., Kozyra J.U., Pätzold M.* The interplanetary causes of geomagnetic activity during the 7–17 March 2012 interval: a CAWSES II overview // *J. Space Weather Space Clim.* V. 4. A02. 2014.  
<https://doi.org/10.1051/swsc/2013056>
- *Tsurutani B.T., Hajra R.* The interplanetary and Magnetospheric causes of Geomagnetically Induced Currents (GICs) > 10 A in the Mäntsälä Finland Pipeline: 1999 through 2019 // *J. Space Weather Clim.* V.11. A23. 2021.  
<https://doi.org/10.1051/swsc/2021001>
- *Viljanen A., Häkkinen L.* IMAGE magnetometer network / Satellite-ground based coordination sourcebook. Eds. Lockwood M., Wild M.N., Opgenoorth H.J. ESA publications SP-1198. P. 111–117. 1997.
- *Viljanen A., Tanskanen E.I., Pulkkinen A.* Relation between substorm characteristics and rapid temporal variations of the ground magnetic field // *Ann. Geophys.* V. 24. № 2. P. 725–733. 2006.  
<https://doi.org/10.5194/angeo-24-725-2006>
- *Wiens R.G., Rostoker G.* Characteristics of the development of the westward electrojet during the expansive phase of magnetospheric substorms // *J. Geophys. Res.* V. 16. P. 2109–2128. 1975.  
<https://doi.org/10.1029/JA080i016p02109>