

УДК 550.386.6

НАЛОЖЕНИЕ АВРОРАЛЬНЫХ ТОКОВ В ОБЛАСТИ РАЗРЫВА ХАРАНГА

© 2022 г. А. Н. Зайцев¹, *, К. Х. Канониди¹, **, В. Г. Петров¹, ***

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

*e-mail: zait@izmiran.ru

**e-mail: kkkh@izmiran.ru

***e-mail: vpetrov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 04.02.2022 г.

После доработки 15.04.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

По данным наземных магнитометров найдены и описаны случаи наложения авроральных электроструй в зоне полярных сияний в моменты развития разрыва Харанга. Показано, что в области разрыва Харанга формируются особые условия развития элементов токовых систем, которые можно учесть только при специальном методе разделения типа вариаций по морфологическим признакам. При точности определения положения электроструй по наземным данным в пределах десятков километров для высоты слоя E ионосферы в 115 км схождение электроструй составляет 20–30 км. Обнаруженные свойства токов при формировании разрыва Харанга следует учесть при построении эквивалентной ионосферной токовой системы, которая определяет динамику развития суббурь.

DOI: 10.31857/S0016794022050170

1. ВВЕДЕНИЕ

В середине прошлого века L. Harang [Harang, 1946] опубликовал результаты исследований характера полярных геомагнитных возмущений на цепочке магнитометров вдоль меридиана Шпицберген–Тромсе–Потсдам. Были детально изучены вариации возмущенного магнитного поля по трем компонентам и обнаружено, что пространственное распределение поля возмущений состоит из двух частей, определяемых положительными и отрицательными бухтами в горизонтальной компоненте поля и разрыва (discontinuity) между ними в вечерние часы местного времени.

В итоге Международного Геофизическогогода 1957–1958 г. были получены данные большого числа полярных обсерваторий, на основе которых выполнены детальные исследования пространственно-временных характеристик полярных геомагнитных возмущений [Фельдштейн и Зайцев, 1965; Feldstein and Zaitzev, 1968]. Было отмечено, что разрыв Харанга представляет собой важную часть токовых систем, связанных с развитием авроральных суббурь [Kamide et al., 1982; Untiedt and Baumjohann, 1993]. Под магнитными суббурями мы будем в дальнейшем понимать проявления магнитных возмущений в авроральной зоне, связанных с развитием авроральной суббури [Akasofu, 1994]. Кроме данных наземных магнитометров, важным средством исследований

стали наблюдения на спутниках, которые подтвердили, что токовые системы охватывают всю магнитосферу [Kunkel et al., 1986]. Благодаря совместным наблюдениям на земле и в космосе были выявлены определяющие элементы полярных геомагнитных возмущений, такие, как овал полярных сияний, токи, текущие вдоль силовых линий, взрывные процессы в хвосте магнитосферы, приводящие к развитию магнитных суббурь. При этом было установлено, что эквивалентная токовая система магнитной суббури формируется тремя источниками: восточной и западной электроструями, текущими вдоль овала полярных сияний, и токов в полярной шапке [Feldstein and Zaitzev, 1968].

Следующим шагом в детальном изучении характера токовых систем был анализ данных плотных цепочек магнитометров, установленных в высоких широтах по программе МИМ “Международные Исследования Магнитосферы”, выполненной в 1976–1986 г. [Untiedt and Baumjohann, 1993]. По мере развития средств наблюдений на земной поверхности (сети магнитометров, радаров, камер всего неба и т.д.), систем спутников на ближних и дальних орбитах (ИНТЕРБОЛ, THEMIS, SWARM, MMS, AMPERE и т.д.) были определены основные параметры элементов токовых систем в масштабах всей магнитосферы. По мере накопления огромного числа фактов и все большей детализации наблюдаемых явлений

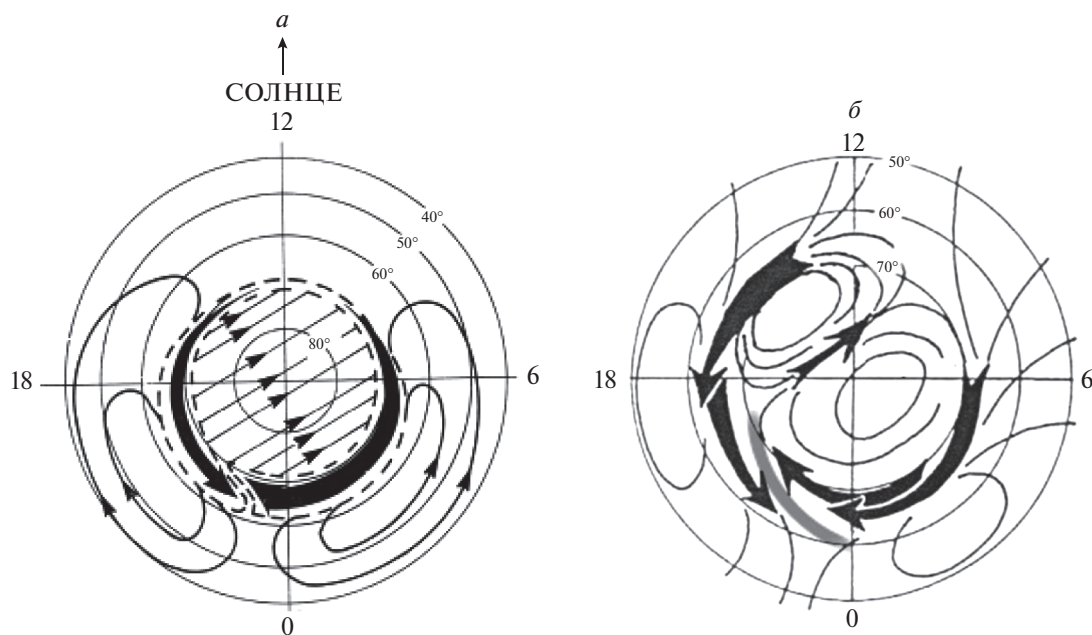


Рис. 1. Положение разрыва Харанга в схеме токов, принятой при анализе данных наблюдений бариевых облаков [Халипов и др., 2000] (а), и по данным наземных магнитометров для токовой системы суббури [Feldstein, Zaitzev, 1968] (б).

стало возможным перейти к решению задачи точного количественного описания наблюдаемых магнитных возмущений. Оказалось, что разрыв Харанга представляет собой сложную структуру, меняющуюся в пространстве и во времени, зависящую от времени суток и времени года и меняющуюся под действием условий в слое Е ионосферы [Kamide and Akasofu, 1976; Kunkel et al., 1986].

На рисунке 1 приведены наиболее распространенные схемы эквивалентных токовых систем, принятые при обсуждении токовых систем в ионосфере для случаев суббурь, на которых видно положение разрыва Харанга. Схема токов рис. 1а была подтверждена экспериментально при ракетных экспериментах с запуском облаков бария [Wescott et al., 1970]. Было показано, что разрыв Харанга представляет собой переход между полярными электроструями. Изучение движения облаков на линии разрыва Харанга показало, что изменение направления их дрейфа происходило в течение нескольких секунд и на расстояниях в единицы километров. Резкое изменение направления электрического поля в зоне разрыва Харанга подтверждается и данными наземных [Despirak et al., 2021] и спутниковых снимков полярных сияний [Nishimura et al., 2010; Zou et al., 2009].

На рисунке 1б представлена схема эквивалентных токов суббури, полученная по наземным данным магнитометров, где положение разрыва Харанга условно показано толстой линией. В основе схемы — главные элементы токовой системы: западная электроструя, текущая вдоль овала

полярных сияний, восточная электроструя в вечерние часы, примыкающая к овалу полярных сияний, и токовый вихрь в полярной шапке, отражающий процесс выпадения частиц солнечного ветра [Feldstein and Zaitzev, 1968].

На схеме отмечено два типа суббурь с наличием двух типов электроструй, имеющих токи противоположного направления. Взрывные суббури — струи, вплотную сходящиеся ввечерние-околополуночные часы, и конвективные суббури, отражающие дрейфовые процессы в магнитосфере при их переносе на высоты ионосферы. Отсюда были определены два типа разрывов Харанга — **discontinuity** — разрыв параметров полей и токов, проявляющийся при анализе мгновенных детальных распределений в магнитном поле и — **reversal** — разворот или реверс в параметрах конвекции, как правило, проявляющийся при площадных наблюдениях с помощью радаров [Vanhamäki et al., 2009]. Многие исследователи при тщательном анализе данных также обнаруживали — **superimposed overlapping** — наложение и взаимодействие ионосферных токов или электрических полей восточной и западной электроструй на высотах ионосферы [Kundel et al., 1986]. Простое перечисление отличий в параметрах токов в области разрыва Харанга показывает сложность анализа результатов измерений. Очевидно, необходимо найти дополнительные параметры и свойства наблюдаемых явлений. Наземные магнитограммы дают возможность ввести и выделить дополнительные свойства токов, наблюдаемых в разрыве

Харанга. Таким образом, дальнейшие исследования пошли по пути изучения тонкой структуры разрыва Харанга и его временных изменений. С 1992 г. по 2019 г. было проведено 14 (!) международных конференций “International Conference on Substorms”, на которых вопрос физики и морфологии явлений авроральных суббурь и области разрыва Харанга был одной из основных тем для обсуждений.

Целью данной работы является анализ пространственно-временных характеристик ионосферных токов в зоне разрыва Харанга на основе данных наземных магнитометров.

2. НАБЛЮДЕНИЯ РАЗРЫВА ХАРАНГА НА П-ВЕ ЯМАЛ

Исследование детальных пространственно-временных характеристик токовых систем с опорой на специальные сети наблюдений продолжает оставаться актуальным направлением изучения динамики ионосферных токовых систем суббурь. В рамках программы “Международные Исследования Магнитосферы” в ИЗМИРАН был организован проект “Геомагнитный меридиан — 145”. Плотная цепочка магнитометров была развернута на Ямале, а ее продолжение включало средние широты и обсерватории в Индии [Зайцев и др., 2018; Kotikov, 1987]. Сеть магнитометров ГМ-145 включала более 30 точек наблюдений. Данные за период 1972–1992 г. в виде микрофильмов были разосланы по сети МЦД. Ведущие геофизические институты ААНИИ, ПГИ и СПб ИЗМИРАН также уделили большое внимание развитию плотных сетей магнитометров в высоких широтах.

После 1986 года аналоговые магнитно-вариационные станции постепенно были заменены на цифровые станции, их расположение представлено на рис. 2. Цифровые данные за период 1986–1996 г. были сформированы в виде базы 1-мин данных, которые затем стали основой исследований в последующие годы (www.cosmos.ru/mag-base/). К сожалению, после 1991 г. поддержка проекта “Геомагнитный меридиан 145” была прекращена и постепенно сеть прекратила свою работу. После проведения очередного Международного Полярного Года 2007–2008 г. был поставлен вопрос о возобновлении наблюдений на Ямале. Начиная с 2013 года, удалось возобновить наблюдения на 4 точках, что, в сочетании с обсерваториями Амдерма и Диксон (ААНИИ) и Норильск (ИСЗФ), позволило продолжить исследование полярных геомагнитных возмущений по сети магнитометров на Ямале. В табл. 1 приведены географические и геомагнитные координаты станций, которые использовались в поиске событий, проявляющихся как разрыв Харанга. Такие события определялись по эффекту наложения

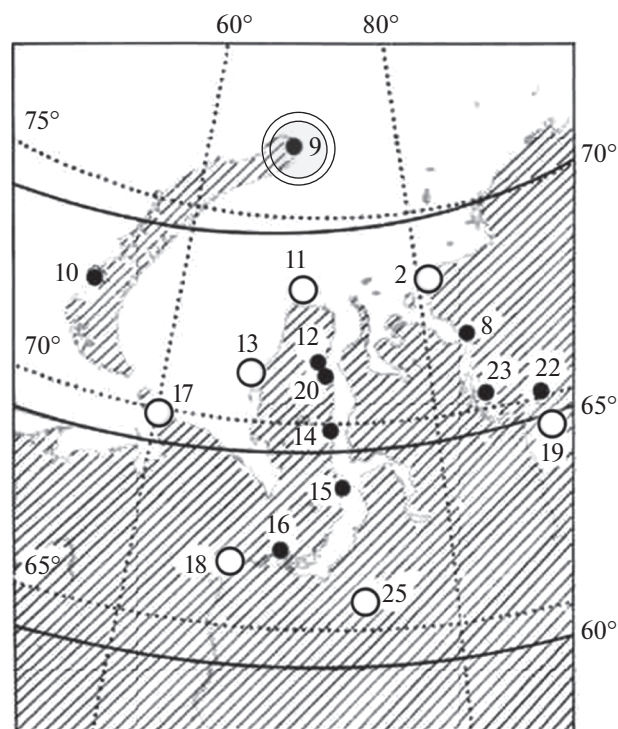


Рис. 2. Карта-схема сети магнитометров, работавших на Ямале с 1972 г. магнитометры, работавшие в период 2013–2021 г. выделены белыми кружочками.

магнитных полей восточной и западной электро-струй [Zaitsev, 1978].

За период 2016–2020 г. наблюдалось достаточно много случаев проявления разрыва Харанга. Для данной работы нами были выбраны три случая, которые относились к разным сезонам. Наличие магнитных данных в нескольких точках на одном меридиане позволяет сделать не только качественное описание структуры токов в зоне разрыва, но и количественно оценить положение и интенсивность токов восточной и западной электро-струй.

3. ОЦЕНКА ПОЛОЖЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО ТОКА

Магнитное поле затухает при удалении от тока, поэтому большие вариации магнитного поля создаются, в основном, токами, расположенными вблизи места наблюдения. В ионосфере Земли в слое E имеется высоко проводящая область, расположенная на высоте 110–130 км, и можно считать, что, в основном, вариации магнитного поля создаются токами, текущими на высоте $h = 115$ км. При простейшей аппроксимации токов токовой линией (I) силовые линии магнитного поля, создаваемого таким током, имеют форму окружностей, и вектор магнитного поля в любой

Таблица 1. Географические и исправленные геомагнитные координаты пунктов наблюдений на “Геомагнитном меридиане 145°” в высоких широтах

Код	Пункт наблюдений	Географические координаты		Исправленные геомагнитные координаты	
		широта, N	долгота, E	широта, N	долгота, E
DIK	Диксон	73.52°	80.68°	69.59°	156.42°
BEY	Белый	73.30°	70.00°	68.20°	145.90°
KHS	Харасавэй	71.18°	66.86°	66.40°	142.10°
NOR	Норильск	69.35°	88.20°	65.30°	162.65°
AMD	Амдерма	69.60°	61.40°	66.04°	136.48°
SAH	Салехард	66.52°	66.67°	63.04°	141.69°
NAD	Надым	65.53°	72.50°	61.85°	145.60°

точке направлен перпендикулярно к линии, направленной от точки измерения на ток, а величина вариации магнитного поля (T в А/м) вычисляется по формуле:

$$T = \frac{I}{2\pi r}.$$

Если подставить в эту формулу числовые значения всех коэффициентов и преобразовать к обычно применяемым единицам измерения (нТл), то получится:

$$T = 200 \frac{I}{r},$$

где T – величина вариации магнитного поля, нТл; I – ток в ионосфере, кА; r – расстояние от точки наблюдения вариации до места протекания тока, км. Магнитное поле на магнитометрах, работающих в системе координат, связанных с направлением местного магнитного поля, компоненту, направленную по местному геомагнитному полю к северу, северную компоненту обозначают как H или Bh , перпендикулярную ей направленную к востоку – как D (в нТл) или E , Z -компоненту – как Z или Bz . Если обозначить расстояние до точки, расположенной под током как x , тогда $r^2 = h^2 + x^2$, где h – высота тока над поверхностью Земли, и, следовательно, расстояние по горизонтали до линейного тока вычисляются по простой формуле

$$x = \frac{hBz}{Bh}. \quad (1)$$

Такое представление, конечно, является сильным упрощением реальной картины, но для оценки положения токов по данным вариаций магнитного поля в одной точке наблюдений приемлемо, так как для применения более сложных методов данных недостаточно.

4. АНАЛИЗ ДАННЫХ

В нашем распоряжении имелись данные по 7 пунктам наблюдений на п-ве Ямал и вблизи него, представленные на рис. 2 и в табл. 1. Для анализа случаев наложения магнитных полей электроструй было выбрано два пункта – о. Белый (Б), *BEY*, и пос. Харасавэй (Х), *KHS* по которым имелись наиболее длинные ряды совместных измерений. Расстояние между пунктами по меридиану около 260 км. Во многих случаях вид вариаций по этим станциям имеет близкое подобие, но вместе с тем можно найти случаи больших расхождений. Для анализа нами были выбраны случаи, когда при развитой восточной электроструе, т.е. на фоне положительной бухты в H -компоненте, наблюдалось резкое уменьшение значения H , по морфологическим признакам вызванное сильным западным током, т.е. формированием отрицательной бухтой. Рассмотрим последовательно эти три примера геомагнитных возмущений и проанализируем свойства токов, формирующих картину разрывов Харанга.

На рисунке 3 представлен пример суббури 06.12.2016 г. Активный период длился в интервале 11:00–15:00 UT, амплитуда положительной вариации H была около 125 нТл, отрицательной вариации H составляла около 300 нТл. Наложение полей в 12:00–14:00 UT в виде разрыва Харанга выделено штрихованной линией, которая показывает предполагаемое поле восточного тока. В первую очередь, наложение магнитных полей прослеживается в H -компоненте магнитометра о. Белый, где начало развития восточной электроструи четко прослеживается как плавный рост H вплоть до момента 12:00 UT. В этот момент по всем трем компонентам магнитного мы видим начало развития западной электроструи, меняющей знак вариаций H -компоненты. Вариации в пос. Харасавэй повторяют вариации о. Белый, хотя вариации в H -компоненте не показывают такого большого влияния западной электроструи, как это видно по магнитометру о. Белый. Проведя

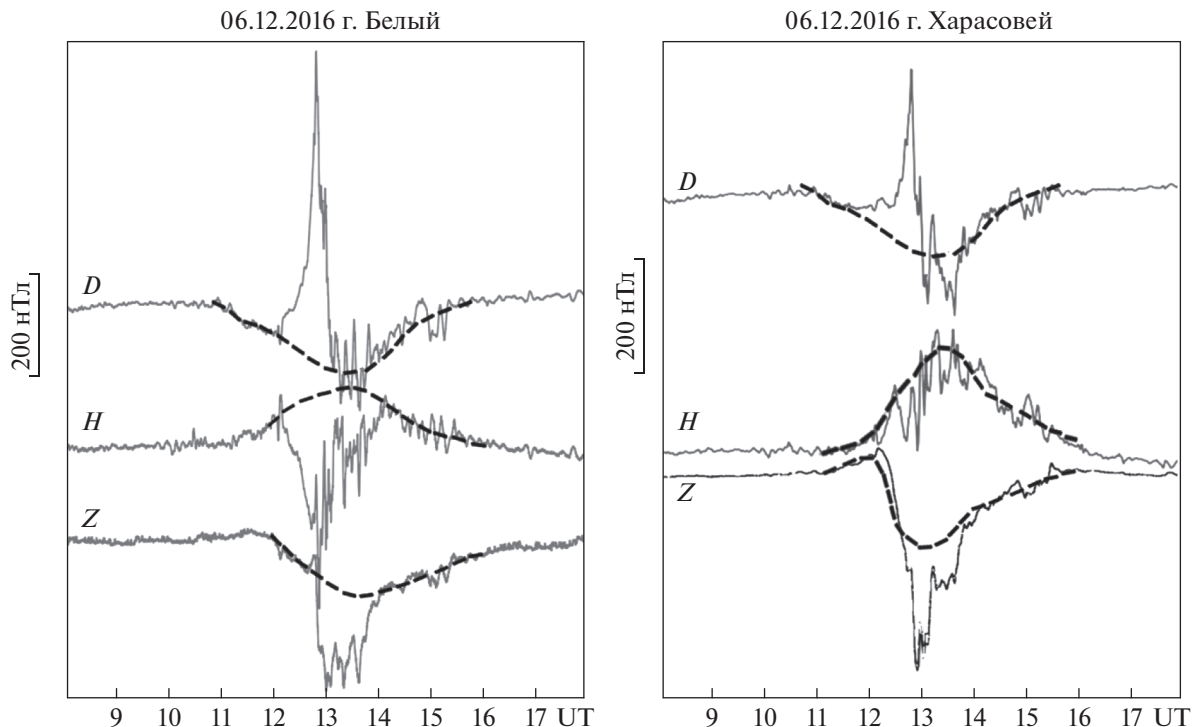


Рис. 3. Суббура 06.12.2016 г. с наложением токов по данным о. Белый и пос. Харасовей. Активный период 11:00–15:00 UT, наложение токов 12:00–4:00 UT выделено штриховой линией, которая показывает магнитное поле восточного тока.

условную штриховую линию показывающую поле, предположительно создаваемого восточным током, мы можем сделать оценку величины и направления токов. Уровень спокойного поля уверенно определяется как прямая линия, соединяющая начало и конец периода суббури. Следует отметить наличие быстрых флуктуаций (пульсаций) магнитного поля, характерных для суббурь [Рахматулин и др., 1979], как на о. Белый, так и в пос. Харасовей. Пульсации в вариации D -компоненты (на всех рисунках D – это восточная компонента магнитного поля измеренная в нТл) показывает быстрые изменения направления токов, что допускает наличие токового вихря в структуре взрывной западной электроструи. Подобные явления характерны для суббурь и часто наблюдались по данным плотных сетей магнитометров в Канаде и Скандинавии [Untiedt et al., 1993; Kunkel et al., 1986; Vanhamäki et al., 2009].

На рисунке 4 представлен пример следующей магнитной суббури 27.04.2018 г. в период времени 15:00–19:00 UT, активный период составлял 2 ч., с 15:40 до 17:30 UT. Суббура наблюдалась в период равноденствия, амплитуда положительной вариаций H -компоненты составляет около 100 нТл, отрицательной – около 300 нТл. По данным о. Белый и пос. Харасовей мы видим наложение магнитных полей, подтверждающих наличие разрыва Харанга. Этот момент выделен штриховой

линией. Наложение положительного и отрицательного возмущения четко прослеживается в H -компоненте как на о. Белый, так и в пос. Харасовей. Мы видим развитие положительной бухты, а в момент 15:40 UT резкое начало отрицательной бухты, сформированной электроструей западного направления. Это вступление прослеживается по всем компонентам, благодаря чему удается провести штрих-линию, которая показывает поле восточной электроструи. Изменения Z -компоненты на этих двух станциях также подтверждает наличие наложения токов – для восточного тока знак вариации сохраняется весь активный период с 14:00 до 20:00 UT, а знак Z -вариации для периода западной струи на о. Белом положительный 16:00–17:00 UT, а по магнитометру пос. Харасовей – отрицательный, что показывает, что центр возникшей электроструи находится между этими пунктами.

На рисунке 5 представлен пример суббури 21.05.2020 г. с наложением полей восточного и западного токов подобно тому, что мы видели на предыдущих рис. 3 и рис. 4. Наложение западной электроструи на восточную наблюдается в период 14:00–16:00 UT на фоне длительного развития положительной бухты от 11:00 до 18:00 UT. Такой вид суббурь характерен для летнего сезона, что видно и по балансу амплитуд – положительная бухта в H имеет величину около 130 нТл на обеих

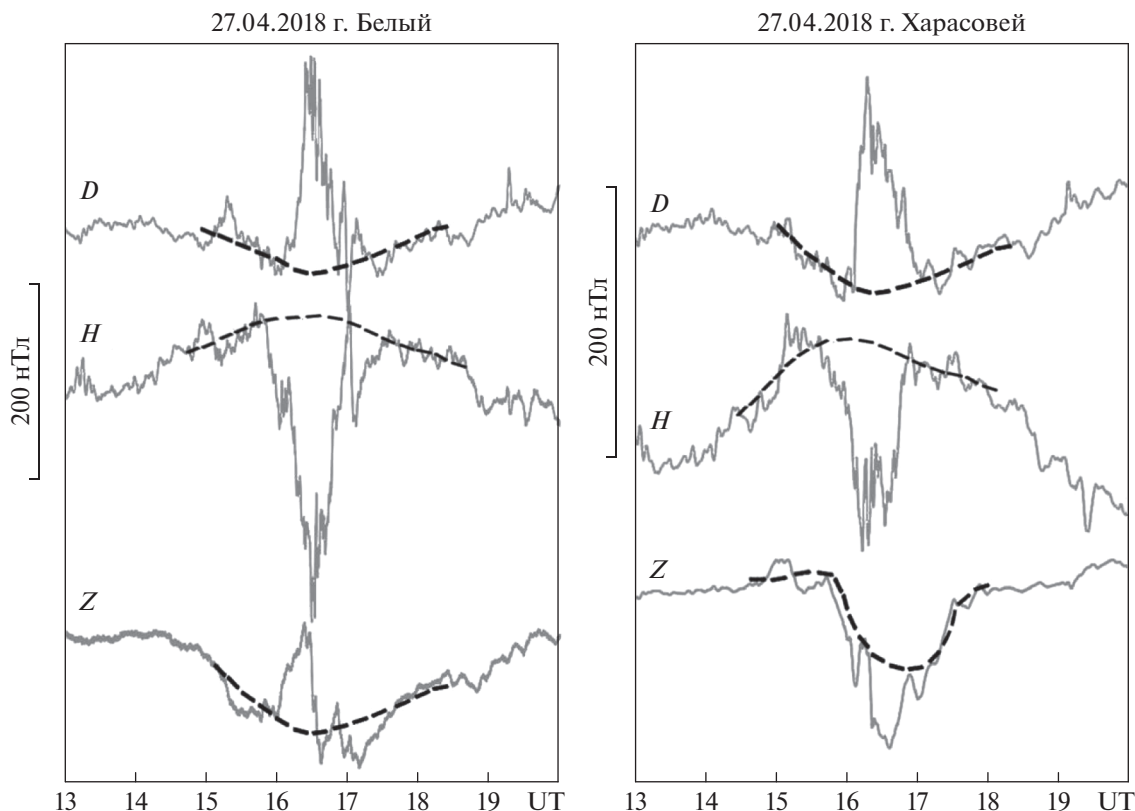


Рис. 4. Суббури 27.04.2018 г. с наложением токов по данным о. Белый и пос. Харасовей. Активный период 14:00–20:00, наложение токов 15:40–7:30 UT выделено штриховой линией, которая показывает магнитное поле восточного тока.

станциях, отрицательная бухта в виде импульса на о. Белый имеет амплитуду более 200 нТл, по магнитометру пос. Харасовей — около 200 нТл. Восточная электроструя (положительная бухта) наблюдается весь период 12:00–18:00 UT, соотношение токов разных направлений 1 : 2. Наложение полей хорошо видно по *Z*-компоненте — знак *Z* меняется при развитии западной электроструи, что подтверждает наложение струйных токов. Сходство вариаций по *D*-компоненте подтверждает, что имеет место развитие струйных токов, которые сохраняют свое направление весь период развития суббури. При этом удается провести штрих-линии, показывающие возможное разделение полей, создаваемых восточной и западной электроструями.

Представленные три случая суббурь, показанных на рис. 3, рис. 4 и рис. 5 с явным наложением магнитных полей токов разных направлений, позволяют описать характер разрыва Харанга как сложное явление. Мы вычислили направление и силу токов по *H*- и *D*-компонентам, по *Z*-компоненте определили положение центров электроструй. На рисунке 6 приведена условная схема положения токов, для трех разобранных случаев, на которых токи направлены поперек меридиана.

На схеме положение магнитометра о. Белый обозначено буквой “Б”, магнитометра пос. Харасовей буквой “Х”. Расстояние между точками наблюдений 260 км, высота токового слоя условно принята в 110 км. Выбраны моменты времени, когда величина токов наибольшая, и факт сближения токов вполне достоверен. Токи условно изображены в виде отдельных токовых струй, интенсивность токов дана не в амперах, а в единицах создаваемого ими поля в нТл, они пропорциональны. Положение стрелок указывает положение западной (стрелка влево) и восточной (вправо) электроструй, определенных по данным одной и другой станций (буквы Б и Х у основания стрелок). Различие в положении электроструй, определенное по данным разных станций, объясняется слишком сильным упрощением применяемой модели электроструи. Вместе с тем, для случая 21.06.2020 г. наблюдаем почти идеальное совпадение в положении электроструй в пределах точности расчетов.

В случае 06.12.2016 г., выделен момент в 13:00 UT, который показывает, что центры токов разнесены на расстояние примерно 330 км, причем, западный ток находится на 80 км севернее о. Белый, восточный ток — прямо над Харасовем. Наложение

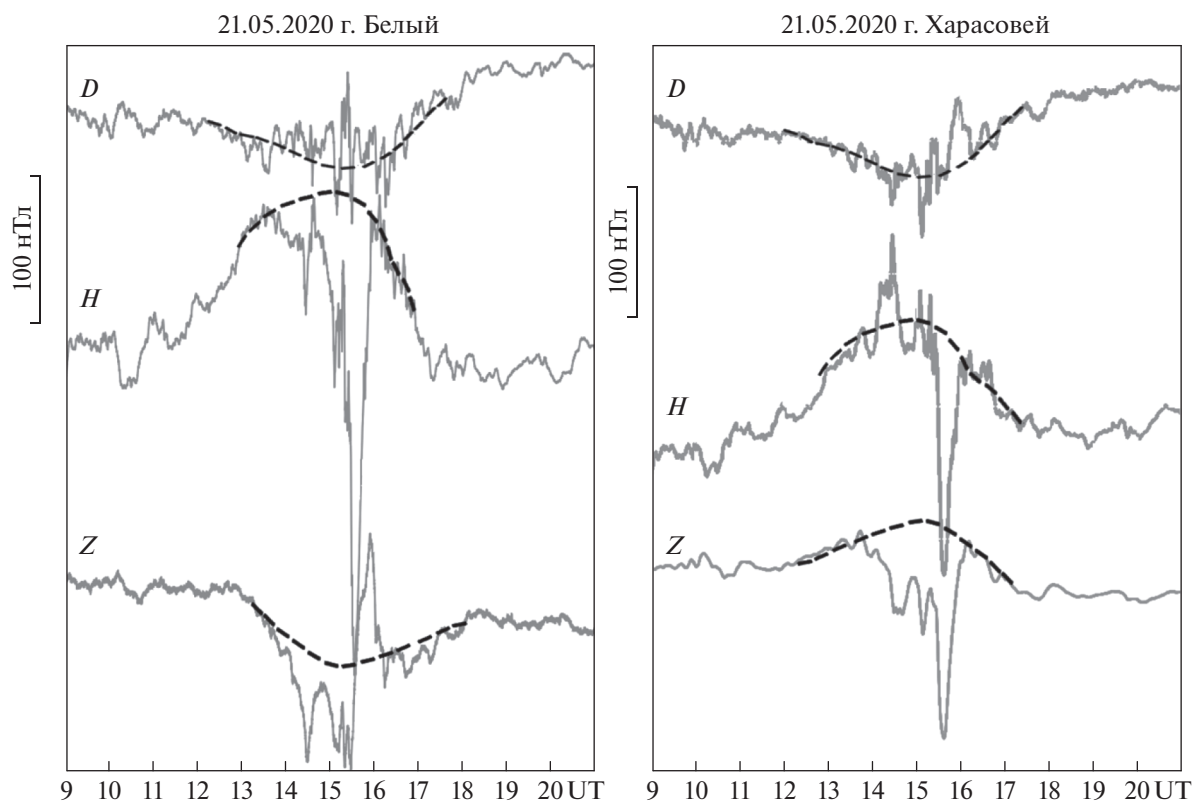


Рис. 5. Суббуря 21.05.2020 г. с наложением токов по данным о. Белый и пос. Харасовей. Активный период 11:00–18:00 UT, наложение токов 13:30–16:20 UT выделено штриховой линией, которая показывает магнитное поле восточного тока.

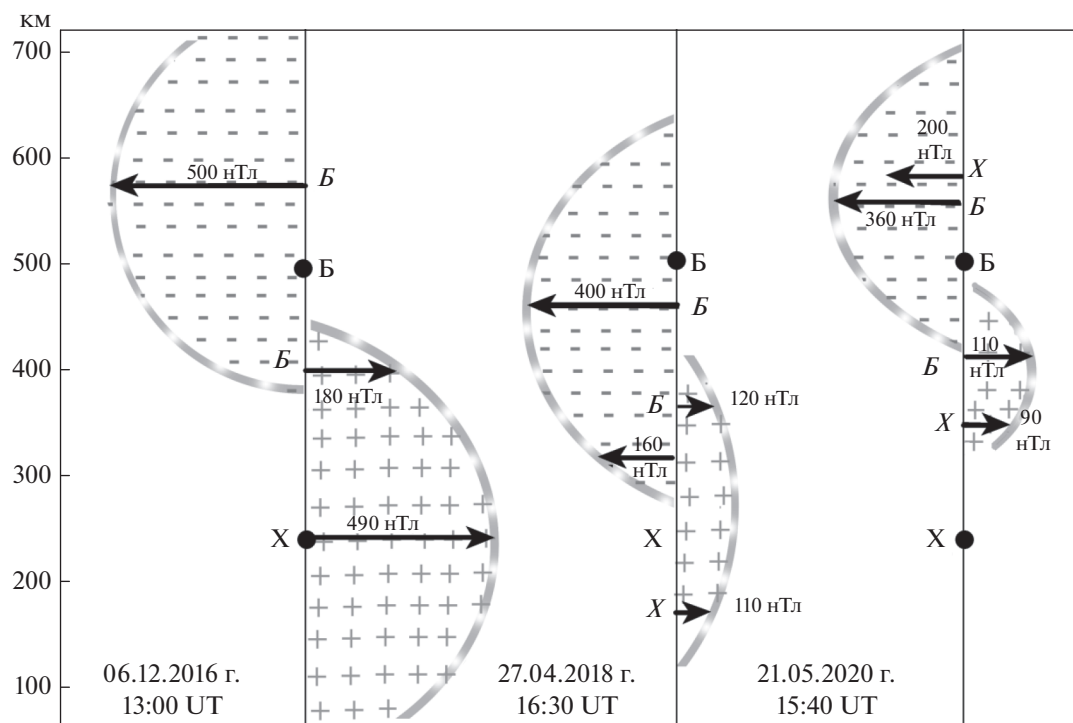


Рис. 6. Меридиональные сечения токов над Ямалом по данным наблюдений на о. Белый и пос. Харасовей для трех событий наложения токов. Токи условно изображены в виде отдельных токовых струй, имеющих наложение друг на друга.

ние полей вполне определенно имеет место, так как по магнитограмме о. Белый мы имеем увеличение поля на 180 нТл, которое определено магнитным полем восточного тока и понижение поля на 500 нТл. По магнитометру п. Харасовэй имеем рост положительной бухты до 490 нТл, понижение поля определить в этот момент не удается, так как западный ток на магнитограмме Харасовэя очень мал.

Случай 27.04.2018 г., выделен момент 16:30 UT. Амплитуда суббури небольшая, характер вариаций четко прописан и показывает наличие токов по обоим пунктам наблюдений. Как и следует ожидать, западный ток (резкое отрицательное понижение магнитного поля) детально видно по магнитограмме о. Белый, амплитуда возмущения, создаваемого током, 400 нТл. Одновременно виден эффект присутствия восточного тока, величина 120 нТл. Магнитограмма Харасовэя показывает наличие восточного тока в 110 нТл, при этом западный ток имеет величину в 160 нТл. При таком балансе токов мы видим достаточно сильное сближение токов, расчетное расстояние между центрами электроструй составляет около 200 км. Остается кардинальный вопрос — как это возможно при известных параметрах ионосферы. Ссылаясь на исследования характера электрических полей с помощью бариевых облаков [Wescott et al., 1970], отметим, что расстояние между областями электрических полей разных знаков составляло примерно несколько километров. Таким образом, можно допустить что расстояние токов разного направления в разрыве Харанга вполне может составить первый десяток километров. Представляется возможным проследить развитие этой суббури и свойств разрыва Харанга с привлечением данных радара обс. Аркти [Oinats et al., 2012] и спутниковой системы AMPERE [Anderson et al., 2000], что мы планируем сделать в следующей публикации.

Для случая 21.05.2020 г. нами выбран момент 15:40 UT, когда наблюдаются максимальное развитие западной электроструи, что хорошо видно на рис. 5. По результатам расчетов положение электроструй оказались близким друг другу, центры электроструй — в пределах 150 км, и вариации магнитных полей подобны. Это указывает на возможность протекания встречных токов при минимальном зазоре между ними. Амплитуда возмущений по магнитограммам всего 200–360 нТл для западной струи, и 90–140 нТл для восточной струи. Отношение силы токов между струями составляет ~ 2 , как и следует ожидать для суббурь в летний сезон.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование пространственно-временных характеристик полярных магнитных возмущений

существенно продвинуло наше представления о токовых системах в магнитосфере Земли. Было показано, что наземные вариации магнитного поля отражают существование самых разных токов: авроральных электроструй, токов обтекания на поверхности магнитосферы, взрывных токов, сопровождающих суббури, токов магнитосферной конвекции, токов вдоль силовых линий, кольцевых токов внутри магнитосферы и токов вдоль ее хвоста. При этом баланс между токами и их вклад в общее поле возмущений все время меняется, как и космическая погода. Один из узловых моментов — сближение токов в разрыве Харанга, с которым предстоит детальнее разобраться и определить его свойства. Следует отметить, что токи в разрыве Харанга известны много лет, но до сих пор нет консенсуса в их определении. Впрочем, консенсуса нет и по другой масштабной проблеме — физике авроральной суббури. Два класса возмущений в магнитосфере определены вполне достоверно — это процессы конвекции и процессы взрывного характера. При этом в этих классах есть много различий по масштабу и по времени. Соответственно, и разрыв Харанга представляет собой многофакторный процесс.

Анализ выбранных случаев позволяет подтвердить ранее сделанное предположение — разрыв Харанга представляет собой наличие токовых струй противоположного направления, близко расположенных друг от друга. Магнитное поле электроструй можно разделить на составные части, скачок в параметрах ионосферы и в электрическом поле показывает быстрое изменение параметров на расстояниях в десятки километров и, возможно, на еще более коротких дистанциях.

В дополнение к наземным геомагнитным наблюдениям исследования токовых систем сегодня проводят с помощью спутников, ракет, радаров и других инструментов, что позволяет перейти к изучению детальной картины токов в системе “солнечный ветер—магнитосфера—ионосфера”. При этом характер токов в области взаимодействия электроструй в разрыве Харанга остаются без детального описания, так как прямые измерения токов на высотах стоя E ионосферы остаются труднодоступными [Халипов и др., 2001], а большая изменчивость системы токов снижает достоверность статистических обобщений.

Создание плотных цепочек магнитометров вдоль меридианов в зоне полярных сияний [Kamide et al., 1982; Untiedt et al., 1993; Kunkel et al., 1986; Зайцев и др., 2018], позволяет детально исследовать характер взаимодействия токов в области разрыва Харанга. Оказалось, что в большинстве случаев зазор между токами представляет собой плавный переход в пространственном распределении полей и токов. В тоже время в отдельных случаях хорошо видно, что происходит сбли-

жение токов разного направления так, как будто токи наложены друг на друга, что показано на рис. 4–6. Тщательный анализ отобранных случаев позволяет выявить знакопеременные бухты и подтвердить именно наличие сближения электро- струй разного направления.

Это удалось сделать при использовании метода разделения ионосферных токов по исходной магнитограмме путем разделения наблюдаемой вариации магнитного поля на поле, создаваемое восточной и западной электроструями, по морфологическим признакам. Эффект наложения магнитных полей токов или эффект сложения магнитных полей от токов разных направлений наблюдается в области разрыва Харанга, и фактически разрыв Харанга представляет собой область взаимодействия электроструй разных направлений.

6. ВЫВОДЫ

На основе проведенного анализа магнитограмм по сети станций на п-ове Ямал и детального изучения магнитограмм о. Белый и пос. Харасовэй были обнаружены знакопеременные бухты, отображающие наложение авроральных токов в области разрыва Харанга. Характер разрывов Харанга по наземным магнитным данным определяется наличием суббурь двух типов: конвективных и взрывных. Как правило, конвективный характер имеют суббури при формировании восточной электроструи, взрывные суббури формируют западную струю, которая наложена на восточную. Наблюдается расположение центров разнонаправленных потоков на расстояниях менее 100 км друг от друга на высоте слоя E ионосферы, и этот факт должен быть принят в расчет при построении эквивалентных токовых систем.

Впервые предложен метод разделения магнитных полей ионосферных токов разного направления по морфологическим признакам, а именно, по исходной магнитограмме с помощью интерполяции магнитных вариаций. Эффект наложения токов или эффект сложения магнитных полей токов разных направлений наблюдается в области разрыва Харанга, который и представляет собой область взаимодействия электроструй разных направлений.

Дальнейшее исследование свойств токов в разрыве Харанга с анализом распределения магнитных возмущений по данным спутниковой системы AMPERE и сравнение с данными радара SuperDARN в обл. Арктики, покрывающего Ямал, помогут выявить наличие вихревых образований токов. Дальнейшее исследование большего числа случаев в сопоставлении с дополнительными данными позволит представить более детальную картину токов в области разрыва Харанга.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты, представленные в этой статье, основаны на данных пунктов наблюдений на Ямале, благодаря работе наблюдателей о. Белый и пос. Харасовэй, которые в условиях Арктики помогают ученым. Также выражаем благодарность сотрудникам ИЗМИРАН подержавших работы на “Геомагнитном меридиане 145”.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в ИЗМИРАН в рамках Государственного задания № 01201356397.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Амиантов А.С., Зайцев А.Н., Одинцов В.И., Петров В.Г. Вариации магнитного поля Земли — база цифровых данных магнитных обсерваторий России за период 1984–2000 гг. на CD-ROM. 2001. <http://www.cosmos.ru/magbase/>
- Зайцев А.Н., Канониди К.Х., Петров В.Г. Перспективы развития геофизического полигона на Ямале // Тр. Второй Всероссийской конф. “Гелиогеофизические исследования в Арктике”. Мурманск, 24–26 сентября 2018 г. Ред. Сафаргалеева Н.Н. Мурманск: изд-во ПГИ. С. 43–46. 2018.
- Куркин И.И., Кутелев К.А., Ойнац А.В., Nishitani N. Перспективы применения радаров SUPERDARN для мониторинга динамики ионосферы в России // Физические основы приборостроения. Т. 1. № 3(4). 2012. <https://doi.org/10.25210/jfor-1203-003018>
- Рахматуллин Р.А., Пархомов В.А., Вакулин Ю.И. Динамика аврорального электроджета и иррегулярных пульсаций во взрывную фазу суббури // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. М.: Наука, Вып. 46. С. 89–94. 1979.
- Фельдштейн Я.И., Зайцев А.Н. Возмущенные солнечно-суточные вариации в высоких широтах в период ММГ // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 5 № 3. С. 481–487. 1965.
- Халипов В.Л., Гальперин Ю.И., Степанов А.Е., Шестакова Л.В. Формирование поляризованного джета в ходе взрывной фазы суббури: результаты наземных измерений // Космич. исслед. Т. 39. Вып. 3. С. 244–253. 2001.
- Akasofu S.-I. The development of the auroral substorm // Planet Space Sci. V. 12. № 273–282. 1964.
- Anderson B.J., Takahashi K., Toth B.A. Sensing global Birkeland currents with Iridium engineering magnetometer data // Geophys. Res. Lett. V. 27. 2000. <https://doi.org/10.1029/2000GL000094>
- 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 // Proc. XLIV Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”. Apatity, 15–19 March 2021 Ed. A.A. Lubchich. P. 16–19. 2021.
- Feldstein Y.I., Zaitzev A.N. Sd-variation of the magnetic field in high latitudes with different intensity of magnetic disturbances // Annales Geoph. V. 24. № 2. P. 1–8. 1968.

- *Harang L.* The mean field of disturbance of polar geomagnetic storms // *Terr. Magn. Atmos. Electr.* V. 51. 1946. <https://doi.org/10.1029/TE051i003p00353>
- *Iijima T., Potemra T.A.* Large-scale characteristics of field-aligned currents associated with substorms // *J. Geophys. Res.* V. 83. P. 599–615. 1978.
- *Kamide Y., Akasofu S.-I.* The Auroral electrojet and field-aligned current // *Planet. Space Sci.* V. 24. 1976. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(76\)90017-9](https://doi.org/10.1016/0032-0633(76)90017-9)
- *Kamide Y., Ahn B.-H., Akasofu S.-I. et al.* Global distribution of ionospheric and field-aligned currents during substorms as determined from six IMS meridian chains of magnetometers: Initial results // *J. Geophys. Res.* V. 87. 1982. <https://doi.org/10.1029/JA087iA10p08228>
- *Kotikov A.L., Latov Y.A., Troshichev O.A.* Structure of auroral electrojets by the data from a meridional chain of magnetic stations // *Geophysica.* V. 23. P. 143–154. 1987.
- *Kunkel T., Untiedt J., Baumjohann W., Greenwald R.* Electric fields and currents at the Harang discontinuity: a case study // *J. Geophysics.* V. 59. P. 73–86. 1986.
- *Nishimura Y., Lyons L., Zou S., Angelopoulos V., Mende S.* Substorm triggering by new plasma intrusion: THEMIS all-sky imager observations // *J. Geophys. Res.* V. 115. A07222. 2010. <https://doi.org/10.1029/2009JA015166>
- *Untiedt J., Baumjohann W.* Studies of polar current systems using the IMS Scandinavian magnetometer array // *Space Sci. Rev.* V. 63. P. 245–390. 1993.
- *Vanhamäki H., Kauristie K., Amm O., Senior A., Lummerzheim D., Milan S.* Electrodynamics of an omega-band as deduced from optical and magnetometer data // *Ann. Geophys.* V. 27. 2009. <https://doi.org/10.5194/angeo-27-3367-2009>
- *Wescott E.M., Stolarik J.D., Heppner J.P.* Auroral and Polar Cap Electric Fields from Barium Releases / Springer. Dordrecht. Particles and Fields in the Magnetosphere. V. 17. P. 229–238. 1970. https://doi.org/10.1007/978-94-010-3284-1_22
- *Zaitsev A.N.* Polar cap geomagnetic variations studies // *Antarctic J. USA.* V. 13. № 4. P. 212–214. 1978.
- *Zou S., Lyons L.R., Nicolls M.J., Heinselman C.J., Mende S.B.* Nightside ionospheric electrodynamics associated with substorms: PFISR and THEMIS ASI observations. // *J. Geophys. Res.* V. 114. A12301. 2009. <https://doi.org/10.1029/2009JA014259>