

УДК 550.3, 550.385

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПО СПУТНИКОВЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ ВО ВРЕМЯ БУРИ 8–9 МАРТА 1970 г.

© 2024 г. А. А. Соловьев^{1,2, *}, И. О. Белов^{1, **}, А. В. Воробьев^{1,3, ***}, В. Н. Сергеев^{1, ****}

¹Геофизический центр РАН (ГЦ РАН), Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), Москва, Россия

³Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

*e-mail: a.soloviev@gcras.ru

**e-mail: i.belov@gcras.ru

***e-mail: geomagnet@list.ru

****e-mail: v.sergeev@gcras.ru

Поступила в редакцию 18.09.2023 г.

После доработки 23.01.2024 г.

Принята к публикации 04.04.2024 г.

Работа посвящена исследованию исторических геомагнитных спутниковых данных, зарегистрированных во время сильной магнитной бури 8–9 марта 1970 г. Помимо данных советского спутника Космос-321 в анализе использовались данные американского спутникаOGO-6, который выполнял геомагнитные измерения в то же время. Изучались вариации внешних магнитных полей, зафиксированные в спутниковых и наземных наблюдениях магнитного поля. Настоящее исследование также послужило толчком к созданию усовершенствованной программной реализации модели аврорального овала АРМ, которая позволяет восстанавливать его положение и интенсивность высыпаний как в прошлом, так и в квазиреальном времени. Идентифицированы магнитные вариации, создаваемые в околоземном пространстве различными источниками. В частности, выделены сигналы кольцевого тока, экваториального и авроральных электроджетов. Статья подчеркивает непреходящую ценность исторических данных наблюдений магнитного поля, хранящихся в центрах данных и непрерывно цифруемых силами их сотрудников.

Ключевые слова: внешнее магнитное поле, морфология возмущений, моделирование аврорального овала, спутниковые наблюдения, исторические данные.

DOI: 10.31857/S0016794024050046, EDN: QRGADL

1. ВВЕДЕНИЕ

Наиболее детальные данные о динамике магнитного поля Земли (МПЗ), вызванной как внешними, так и внутренними источниками, обеспечиваются наблюдениями полного вектора МПЗ низкоорбитальными спутниками с высоким наклоном орбиты [Olsen et al., 2010]. Как правило, высота орбиты таких спутников варьируется от 200 до 800 км. Основная ценность таких данных состоит в полном пространственном покрытии измерениями околоземного пространства за короткий интервал времени. Первые векторные измерения геомагнитного поля появились благодаря запуску спутниковой миссии Magsat. В результате были получены ценные данные за

шестимесячный период между 1979 и 1980 гг., которые позволили впервые построить надежную модель главного МПЗ [Mandea, 2006]. В течение последующих двадцати лет спутниковые измерения такого уровня не проводились, и только с конца 1990-х годов была начата долгосрочная программа изучения МПЗ из космоса, которая длится до сих пор. На сегодняшний день спутники Swarm [Friis-Christensen et al., 2006] являются основным источником информации о динамике МПЗ космического базирования. Существуют и другие низкоорбитальные спутники, регистрирующие параметры МПЗ, однако их данные в открытом доступе отсутствуют.

До появления векторных наблюдений из космоса регистрировались только скалярные измерения полной напряженности МПЗ, которые, несомненно, также представляют большой интерес. Первый магнитометрический спутник Спутник-3 был запущен 15 мая 1958 г. [Skuridin, 1975]. В этой связи необходимо отметить большой труд исследовательских групп, направленный на оцифровку аналоговых массивов исторических данных (МЦД). Так, например, в 2020 г. сотрудниками МЦД по солнечно-земной физике в г. Москве был оцифрован ценный массив скалярных наблюдений МПЗ, которые выполнялись в рамках одних из первых геомагнитных спутниковых миссий Космос-49 (1964 г.) и Космос-321 (1970 г.) [Krasnoperov et al., 2020].

Космос-49 функционировал 11 дней в течение осени 1964 г. — этот период пришелся на минимум солнечной активности между 19 и 20 циклами [Долгинов и др., 1967]. Это обстоятельство делает данные Космоса-49 более пригодными для изучения главного МПЗ, поскольку они в меньшей степени были подвержены зашумленности от внешних полей. Так, *Dst*-индекс геомагнитной активности в течение 11 указанных дней варьировался между -20 и 15 нТл. Напомним, что этот индекс вычисляется по данным приэкваториальных магнитных обсерваторий и отражает интенсивность кольцевого магнитосферного тока, которая увеличивается во время геомагнитных бурь. Космос-321 проработал 53 дня в зимне-весенний период 1970 г., который приходился на максимум солнечной активности 20-го цикла [Долгинов и др., 1976]. Тем самым, полученные за этот период данные являются ценным материалом для изучения магнитосферных и ионосферных магнитных полей. Наоборот, для изучения главного МПЗ эти данные должны быть существенным образом отфильтрованы для очистки от сигналов внешних полей.

В этот же период, с 1965 по 1971 гг., работали американские спутники серии POGO (*Polar Orbiting Geophysical Observatory*). В частности, спутники OGO-2, OGO-4 и OGO-6 обеспечили скалярные измерения магнитного поля [Jackson and Vette, 1975], которые были использованы для построения модели Международного эталонного геомагнитного поля (IGRF) за 1965 г. [Cain et al., 1967]. Оцифрованные магнитные данные, собранные этими спутниками, доступны на веб-сайте Датского технического университета (https://www.space.dtu.dk/english/research/scientific_data_and_models/magnetic-satellites). Такие исторические данные предоставляют широкие возможно-

сти для ретроспективного анализа геомагнитного поля, от изучения отдельных геомагнитных событий до исследования динамики главного МПЗ. Очевидно, привлечение дополнительно данных наземных обсерваторий делает такой анализ более полным (см., например, [Kozyreva et al., 2019; Petrov and Krasnoperov, 2020]).

Целью данной работы является изучение отдельных сигналов внешних магнитных полей за период геомагнитной бури 8–9 марта 1970 г. Источником информации послужили оцифрованные массивы скалярных наблюдений магнитного поля, которые выполнялись спутниками Космос-321 и OGO-6. Для тех лет характерный срок работы подобных спутников составлял от нескольких недель до месяцев. Именно поэтому анализируемый материал, который представляет собой бурю, запечатленную в данных низкоорбитальных спутников, является довольно редким. При интерпретации полученных результатов дополнительно анализировались современные данные моделирования, дающие представление о конфигурации аврорального овала во время рассматриваемой бури.

2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БУРИ 8–9 МАРТА 1970 Г. И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Полученные спутником Космос-321 данные представляют большой интерес для изучения вариаций полей именно магнитосферного и ионосферного происхождения, поскольку за период измерений наблюдался максимум солнечной активности. Удачным образом за 53-дневный период его функционирования имела место сильная геомагнитная буря, которая произошла 8–9 марта 1970 г. Об этом свидетельствуют значения индекса геомагнитной активности *Dst*, опустившиеся до -284 нТл (рис. 1), что классифицирует указанное событие как супербурю ($Dst \leq -250$ нТл). Именно этому событию, редкому с точки зрения наличия для него спутниковых наблюдений, и посвящено настоящее исследование.

По характеру изменения *Dst* исследуемая супербуря была отнесена к типу III, т.к. *Dst* оставался отрицательным в течение более 72 часов до момента достижения своего минимального значения. Она была вызвана областью сжатия перед магнитным облаком (Sheath) — именно эта часть возмущенного потока в солнечном ветре в среднем возбуждает наиболее сильные бури [Ермолаев и др., 2007]. Связанная с этим событием солнечная вспышка класса M5.1 возникла в локации S11E09 (нумерация зон по линии калыция) активного региона 10614 [Meng et al., 2019; Formisano, 1973].

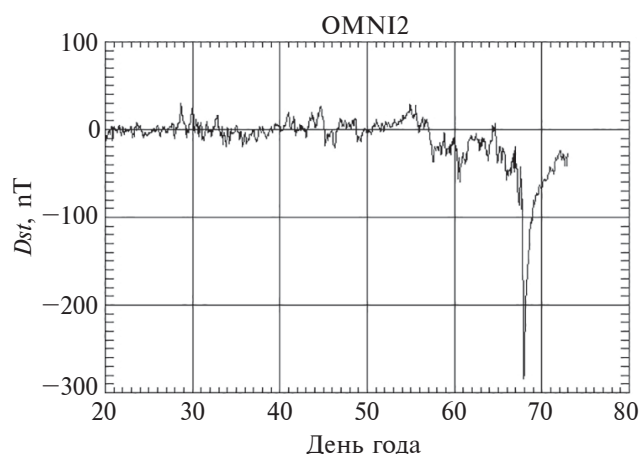


Рис. 1. Значения Dst -индекса с 20 января по 13 марта 1970 г. (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>).

Изучим более детально состояние межпланетной среды за период 6–10 марта 1970 г. Для этого обратимся к параметрам солнечного ветра (рис. 2а), регистрируемым межпланетными спутниками в точке Лагранжа $L1$, данные которых аккумулируются в системе OMNIweb (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>). Основным триггером глобальных магнитных возмущений служат отрицательные значения вертикальной компоненты B_z межпланетного магнитного поля. С 7 по 8 марта она испытывала сильные флуктуации, достигая пикового отрицательного значения -20 нТл в районе 20 UT 8 марта. Предшествовал этому резкий скачок скорости солнечного ветра V с 500 до 800 км/с около 9–11 UT того же дня. Он же привел к стремительному повышению плотности солнечного ветра n с 5 до 50 см⁻³ около 19–20 UT. Изменения всех этих параметров являются показательными предвестниками геомагнитной бури.

Для диагностики околоземного пространства привлечем к исследованию наземные данные о вариациях магнитного поля. Рассмотрим за 6–10 марта 1970 г. значения индексов геомагнитной активности, которые вычисляются по наземным наблюдениям магнитного поля, отражающие (1) уровень геомагнитной возмущенности в планетарном масштабе (Kp -индекс), (2) интенсификацию токов вдоль границ аврорального овала в субполярной зоне ионосферы (AE -индекс) и (3) интенсивность кольцевого тока (Dst -индекс) (рис. 2б). К сожалению, PC -индекс для оценки геомагнитной активности над полярной шапкой, вызванной изменениями межпланетного магнитного поля, до 1975 г. недоступен. С 6 марта наблюдался уверенный рост значений Kp -индекса с 3 баллов до 8.5 (максимальное зна-

чение Kp -индекса составляет 9 баллов), которое было достигнуто к 20–21 UT 8 марта, после чего последовали довольно резкий спад до середины 9 марта и снова всплеск до 6 баллов около 17 UT того же дня. Анализируя значения Dst -индекса можно наблюдать характерное для масштабной бури бухтообразное ослабление магнитного поля до почти -300 нТл около 22 UT 8 марта, совпадающее по времени с пиковым значением Kp -индекса. Этот период характеризует главную фазу геомагнитной бури, после которой последовала медленная фаза восстановления. На графике AE -индекса максимальный пик наблюдается около 14 UT 8 марта; следующий за ним изолированный всплеск приходится на 9 марта, в районе 17 UT. Первый пик, составляющий ~ 2300 нТл, связан с общей активизацией электромагнитных процессов в полярной шапке, а второй, достигающий ~ 900 нТл, — с активизацией суббулевой активности на фоне восстановительной фазы бури.

Согласно [Долгинов и др., 1972], за период бури 8–9 марта 1970 г. со спутника Космос-321 была получена фрагментарная информация за следующие временные интервалы:

1. 23:18 UT 8 марта — 00:44 UT 9 марта (виток 744);
2. 00:50 — 03:49 UT 9 марта (витки 745, 746);
3. 23:23 UT 9 марта — 00:49 UT 10 марта (виток 760).

Таким образом, указанная информация была получена в периоды фазы восстановления бури, релаксации токового кольца и развития отдельных суббурь. Перечисленные витки отмечены кругами на графике Dst на рис. 2б. Вместе с тем, в самих каталогах данных [Долгинов и др., 1976] наблюдения за эти периоды отсутствуют (рис. 3), возможно, по причине сбоев в их передаче со спутников. Такие сбои могли быть вызваны воздействием потока высокоэнергетических частиц, который сопровождал активизацию солнечного ветра, на бортовую электронику. Возможно, эти данные были утрачены при первичной обработке данных либо при составлении каталога. Тем не менее, данные спутника Космос-321 за весь период наблюдений имеют достаточно плотное географическое покрытие Земли и могут быть использованы при изучении глобальных токовых структур (см. рис. 3).

Однако, в [Долгинов и др., 1972] приведены полярные проекции траектории спутника за витки 744, 746 и 760 при его пересечении полярной шапки южного полушария в ночные часы по местному магнитному времени с отображением измеренной магнитной вариации и указанием по-

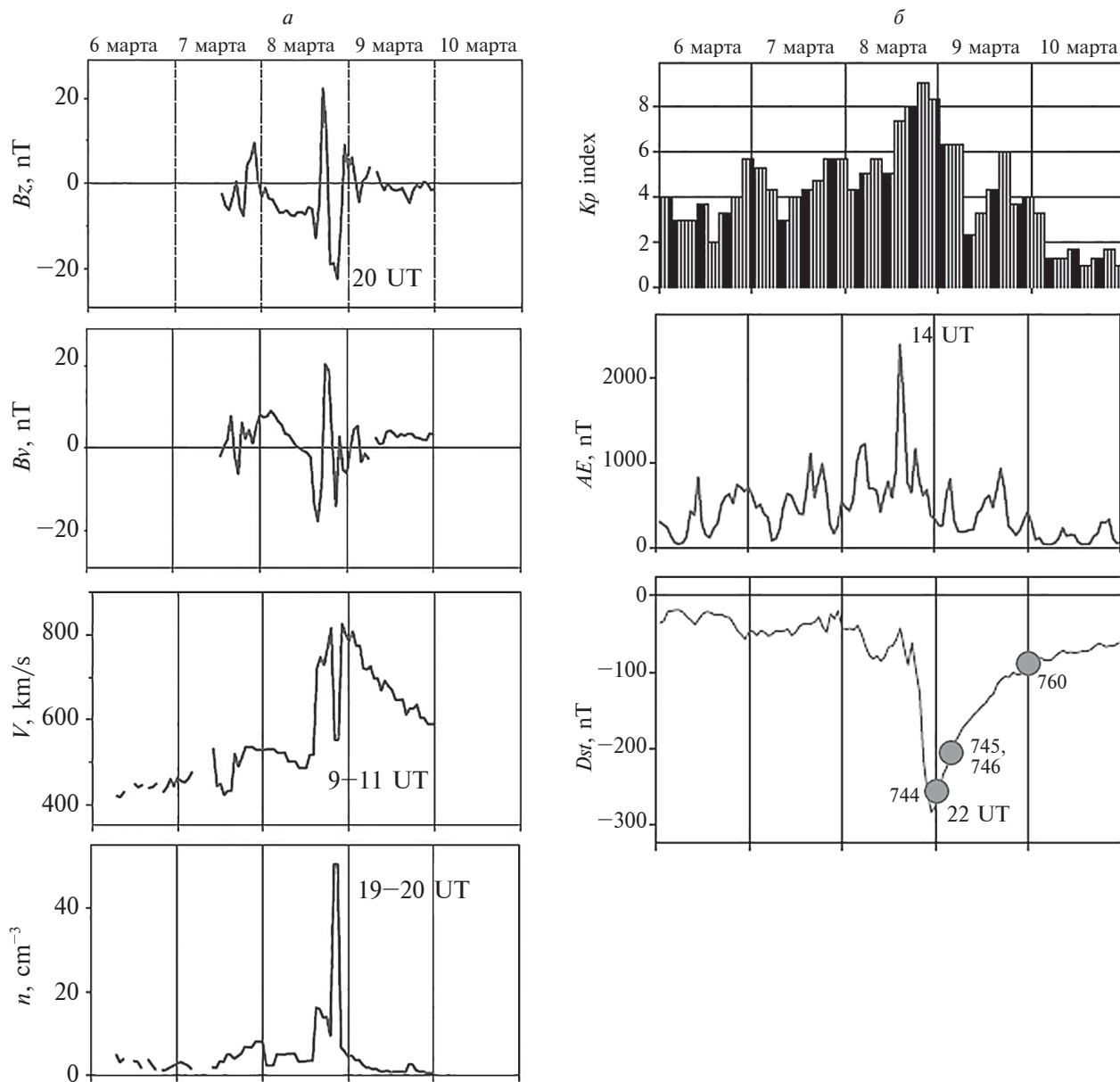


Рис. 2. Параметры межпланетного магнитного поля и солнечного ветра за 6–10 марта 1970 г.: (а) — компоненты B_z и B_y в системе координат GSE, скорость V и плотность n ; (б) — индексы геомагнитной активности K_p , AE и Dst . Кругами на графике Dst обозначены временные отметки витков 744, 745–746 и 760 спутника Космос-321.

ложения аврорального электроджета (рис. 4). Высота спутника при этом составляла 290–330 км.

Для более подробного изучения этого события с привлечением спутниковых наблюдений единственным вариантом остается использовать данные аналогичной спутниковой миссии OGO-6, выведенной на полярную орбиту в тот же период времени [Jackson and Vette, 1975]. Приполярные ионосферные токовые системы во время сильных геомагнитных возмущений имеют сложную кон-

фигурацию. Для разделения их вкладов на ночной/дневной стороне в северном/южном полушарии требуется преобразование времен отсчетов из UT в местное время (LT). Это дает возможность понять, где в каждый момент времени находился низкоорбитальный спутник с учетом его квазигелиосинхронной орбиты. Кроме того, интерес представляет только возмущенная составляющая МПЗ, т.е. его вариации относительно некоторого базового уровня. Наблюдаемое на высоте проле-

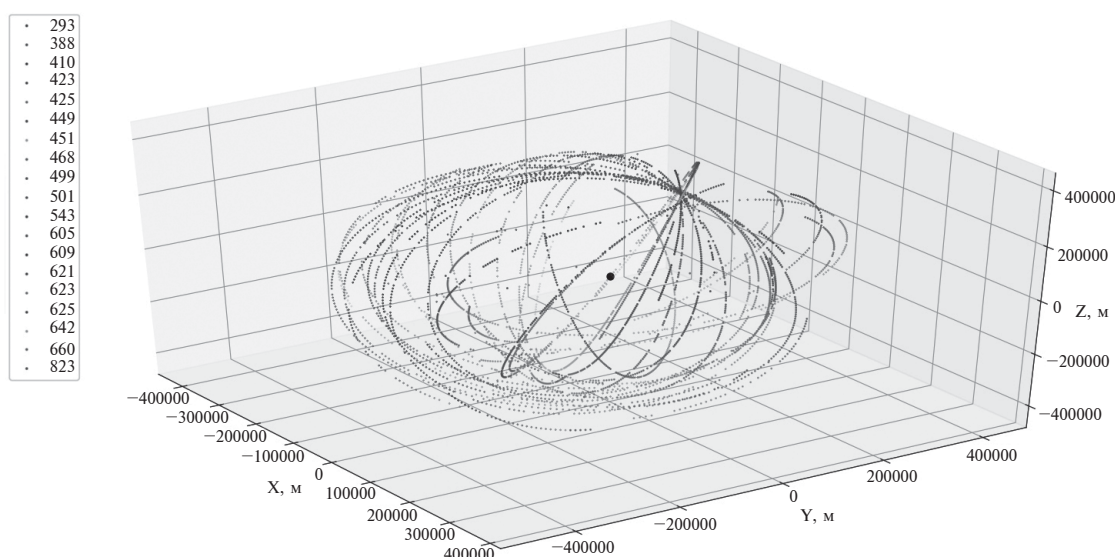


Рис. 3. Витки спутника Космос-321, данные по которым приведены в каталоге [Долгинов и др., 1976], с указанием их номеров.

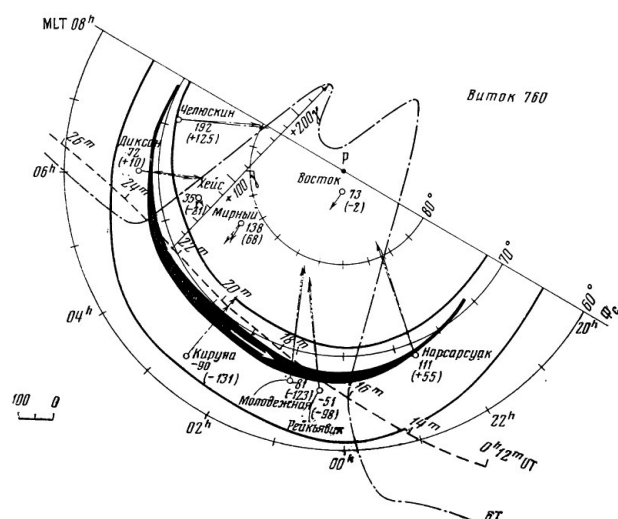


Рис. 4. Пролет спутника Космос-321 над полярной шапкой южного полушария на витке 760 в координатах “исправленная геомагнитная широта” — “местное магнитное время”. Показаны траектория движения спутника с указанием отсчетов UT, возмущенная составляющая поля δT вдоль траектории и положение аврорального овала [Долгинов и др., 1972].

та спутника магнитное поле складывается из сигналов внутренних источников (литосферное и главное поля) и внешних (локализованное поле ионосферного происхождения и масштабное магнитосферное). Литосферное магнитное поле быстро затухает с увеличением расстояния от источника, поэтому на орбите спутника высотой

несколько сотен километров его сигнал достаточно слаб. Таким образом, для изучения интересных нас внешних источников необходимо из наблюдений вычесть вклад главного поля, имеющего масштабную пространственно-временную изменчивость. Для этого воспользуемся моделью IGRF [Alken et al., 2021] и рассчитаем модельные значения поля в каждой точке наблюдений. Величина dF , получившаяся в результате вычета модельных значений главного поля из наблюдаемых значений, и будет в основном содержать в себе вклад внешних источников (рис. 5).

3. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ, СОЗДАВАЕМЫХ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ РАЗЛИЧНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

Для начала рассмотрим графики dF , построенные для полного витка спутника OGO-6 за выбранные геомагнитно-спокойные периоды непосредственно до и после бури 8–9 марта 1970 г. Ниже приведем их обозначения, время UT и средние значения геомагнитных индексов и параметров солнечного ветра (СВ):

1. виток q1: 05:24–07:04 UT 6 марта, $Dst \sim -24$ нТл, $Kp \sim 3$, $AE \sim 80$ нТл, $V \sim 420$ км/с, $n \sim 4$ см⁻³ (рис. 6);
2. виток q2: 12:03–13:42 UT 10 марта, $Dst \sim -73.5$ нТл, $Kp \sim 1$, $AE \sim 32$ нТл, параметры СВ недоступны (рис. 7).

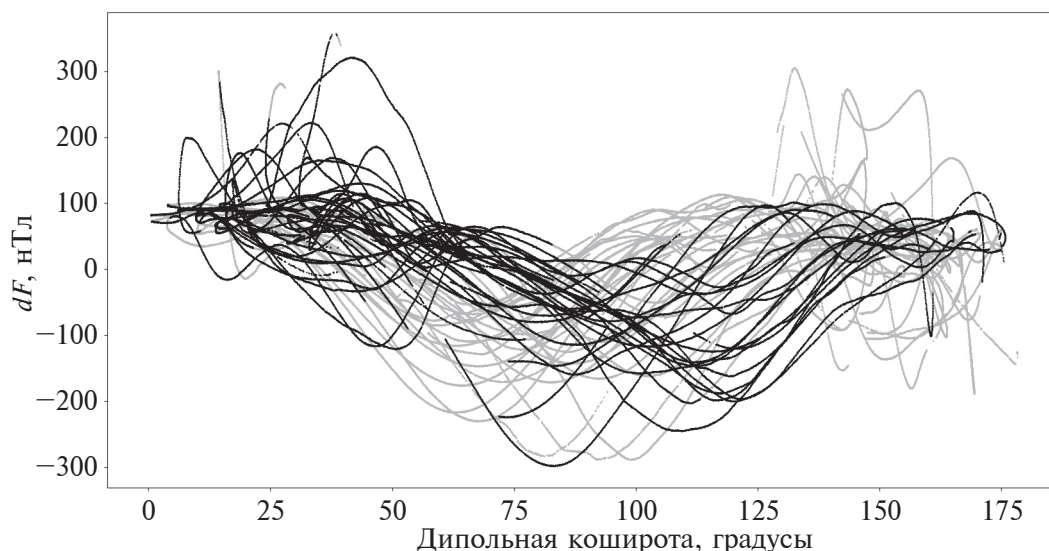


Рис. 5. Изменчивость возмущенной составляющей поля dF за период с 00:00 UT 8 марта по 23:59 UT 9 марта 1970 г. Черным обозначены пролеты на ночной стороне, серым — на дневной.

За период 6–10 марта 1970 г. орбита спутника проходила через утренний и вечерний пояса местного времени. При анализе dF за период пониженной магнитной активности отчетливо прослеживается сигнал экваториального электроджета, который представляет собой токовую систему, текущую в ионосфере на высоте около 108 км вдоль геомагнитного экватора и наиболее отчетливо проявляющуюся в районе местного полудня [Lühr et al., 2004; Yamazaki and Maute, 2017]. Этот ток генерируется в результате динамо-процесса, а порождаемое им электрическое поле дополнительно ответственно за вертикальный плазменный фонтан и аномалию экваториальной ионизации в низких широтах. Таким образом, магнитные измерения экваториального электроджета позволяют изучать движение плазмы в низких широтах в областях E и F ионосферы. Эта токовая система проявляется в виде снижения напряженности магнитного поля над ионосферой на несколько десятков нТл. Резкий отрицательный пик этой аномалии очень близок к положению геомагнитного экватора. В случае витка q1 он приходится на 6° N в утреннем секторе, достигая -50 нТл, и 0° в вечернем секторе, достигая -40 нТл. В случае витка q2 пику соответствуют еще меньшие значения напряженности поля. В утреннем секторе он приходится на $\sim 0^\circ$, достигая -65 нТл, а в вечернем секторе — на 6° N, достигая -75 нТл. Это обусловлено тем, что на витке q2 спутник находился во время восстановительной фазы бури 8–9 марта 1970 г., в течение которой, несмотря на общий спад геомагнитной

активности ($Kp \sim 1$), более масштабный кольцевой ток магнитосферы по-прежнему был достаточно силен ($Dst \sim -73.5$ нТл по сравнению с $Dst \sim -24$ нТл для витка q1) и вносил свой вклад в наблюдения. Это также приводит к широтному “размыванию” соответствующей аномалии, что делает пик менее четким.

Сигнал экваториального электроджета, обнаруженный при пролетах спутника над всеми долготными секторами экватора на дневной стороне, среди прочего, может быть использован для точного определения положения всего геомагнитного экватора на высоте ионосферы. В свою очередь, эта информация является крайне полезной для минимизации так называемого “эффекта Бакуса” [Khokhlov et al., 1997] при построении точных моделей главного МПЗ только по скалярным данным [Holme et al., 2005].

Для изучения геомагнитных возмущений во время бури 8–9 марта 1970 г. нами были отобраны данные полных витков спутника OGO-6, которые по времени максимально соответствовали виткам 744, 745, 746 и 760 спутника Космос-321. Обозначим эти витки спутника OGO-6, соответственно, d1, d2, d3, d4. Далее по ним были построены графики dF (рис. 8). В отличие от данных, полученных за витки q1 и q2, в данном случае пиковые значения dF по модулю составляют сотни нТл. Так, в области приэкваториальных широт dF опускается до отметки почти -300 нТл, что связано с депрессией магнитного поля в результате усиления кольцевого тока магнитосферы, которое

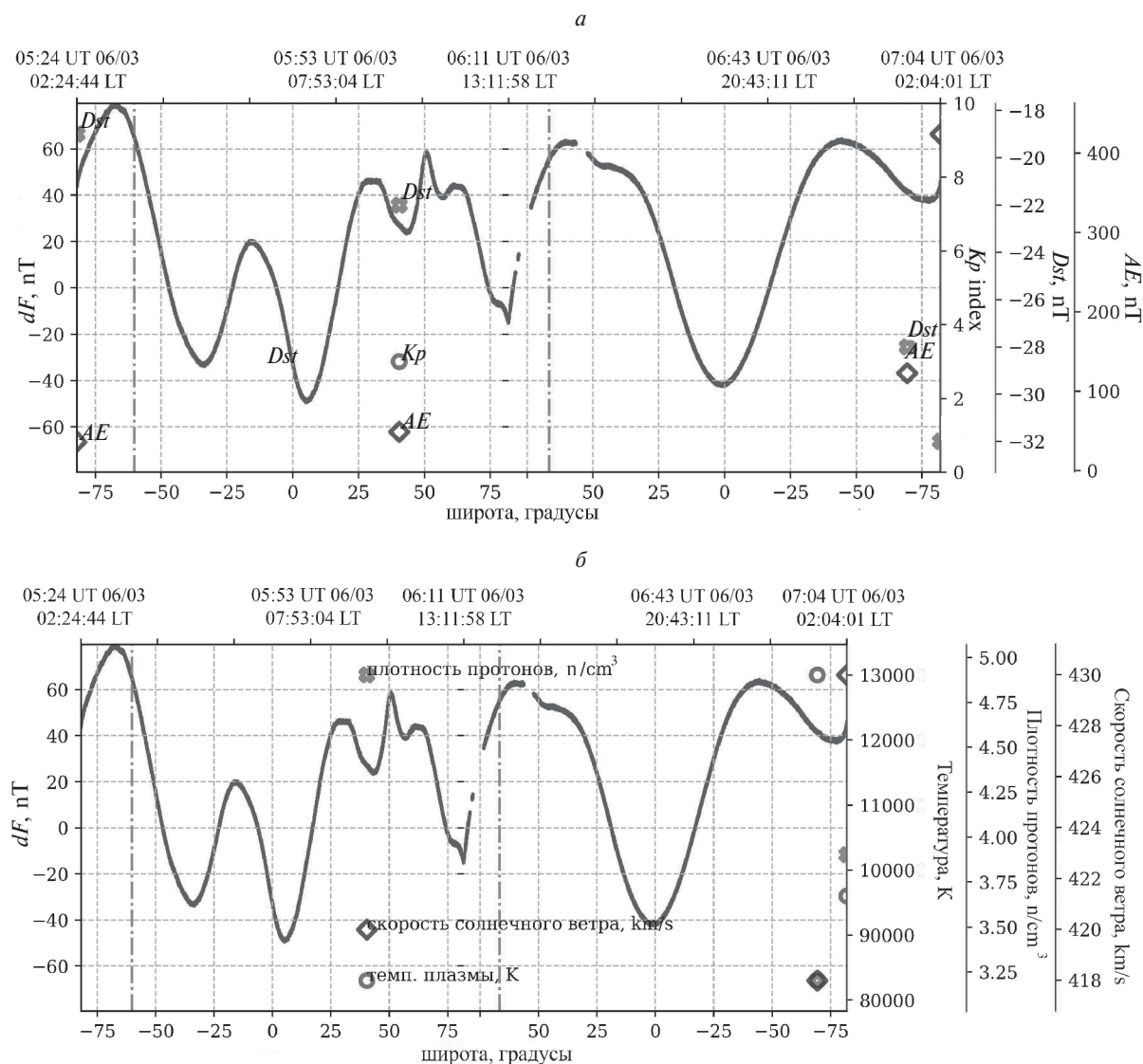


Рис. 6. Характер изменения возмущенной составляющей поля dF за виток q1 по данным спутника OGO-6 с дополнительными параметрами: (а) — ромбом отмечены значения индекса AE (временное разрешение исходных данных — 1 час), кругом отмечен индекс Kp (разрешение исходных данных — 3 часа), крестиком отмечен индекс Dst (разрешение исходных данных — 1 час); (б) — ромбом отмечены значения скорости солнечного ветра, кругом — температуры плазмы, крестиком — плотности протонов (разрешение всех этих данных — 1 час). Легенда и шкала по дополнительным параметрам находятся справа от графика. Вертикальные пунктирные линии отмечают место пересечения условного терминатора (смены дневной стороны на ночную и наоборот).

сопровождает главную фазу бури. Те же значения мы можем наблюдать на графике Dst -индекса (см. рис. 2б). В области высоких широт значения dF достигают 300 нТл из-за активизации электромагнитных процессов в полярной ионосфере в результате магнитосферно-ионосферного взаимодействия.

Отдельного внимания заслуживают данные, полученные за виток d4 (22:48 UT 9 марта —

00:17 UT 10 марта) сразу после активизации суббуревой активности, пик которой пришелся на ~17 UT 9 марта ($Kp \sim 6$, $AE \sim 900$ нТл). С 23:26 UT по 23:45 UT 9 марта спутник как раз пересекал полярную шапку северного полушария, перемещаясь с утреннего сектора на вечерний. На графике dF на соответствующих широтах наблюдается схожая морфология геомагнитных возмущений, как и в аналогичных данных спутника Космос-321 за виток 760, полученных примерно

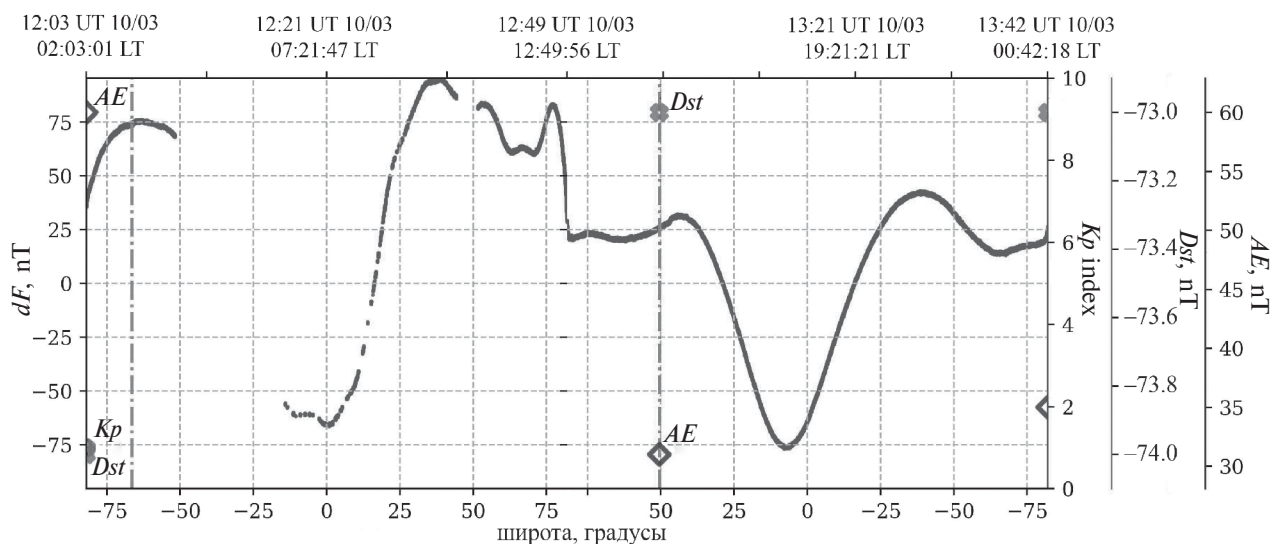


Рис. 7. Характер изменения возмущенной составляющей поля dF за виток q2 по данным спутника OGO-6. Обозначения аналогичны рис. 6a.

в это же время, с 00:12 UT по 00:26 UT 10 марта, при пересечении спутником южной полярной шапки (рис. 4, данные приведены в [Долгинов и др., 1972]). Эти данные соответствуют фазе затухания суббуревой активности ($AE \sim 350$ нТл). В этот период кольцевой ток ослаб ($Dst \sim -90$ нТл) и заметная асимметрия отсутствует, что позволяет более точно выделить эффекты полярных электродрожетов.

Для более детального анализа локализованных возмущений магнитного поля в полярной области за виток d4 необходима информация о пространственной конфигурации аврорального ова-

ла в момент его пересечения спутником. Для этих целей была разработана современная программная реализация модели авроральных высыпаний APM (*Auroral Precipitation Model*) [Vorobjev et al., 2013], позволяющая восстанавливать конфигурацию аврорального овала с шагом дискретизации по времени 1 час начиная с конца 1960-х гг. Полученный продукт, являющийся логичной эволюцией исходной модели, ориентирован на модернизацию подхода к представлению результатов моделирования, управление слоями и создание новой интерактивной веб-платформы, которая позволяет интегрировать и сопоставлять между

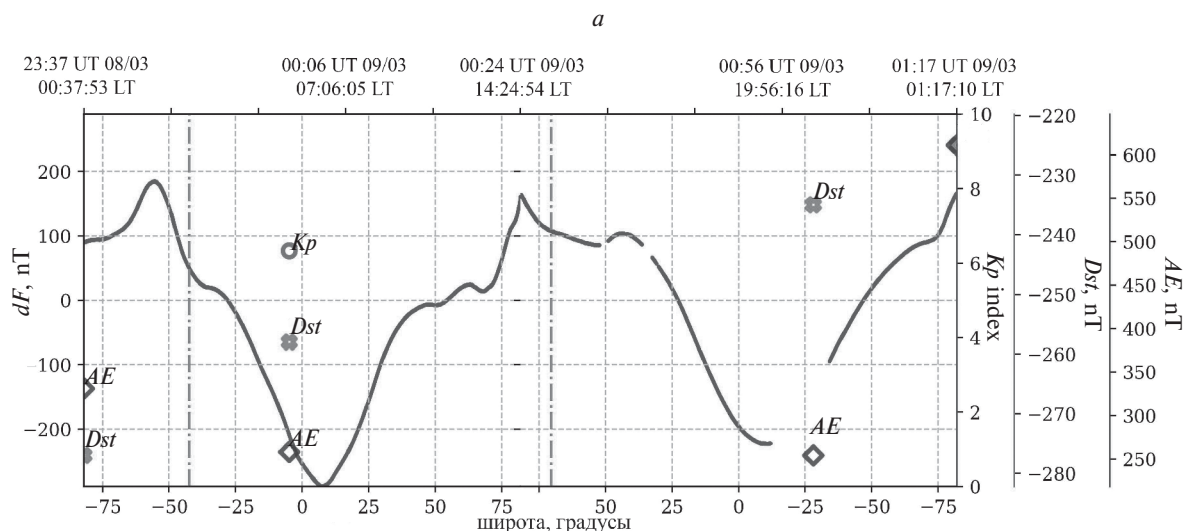


Рис. 8. Характер изменения возмущенной составляющей поля dF по данным спутника OGO-6: (a) — за виток d1

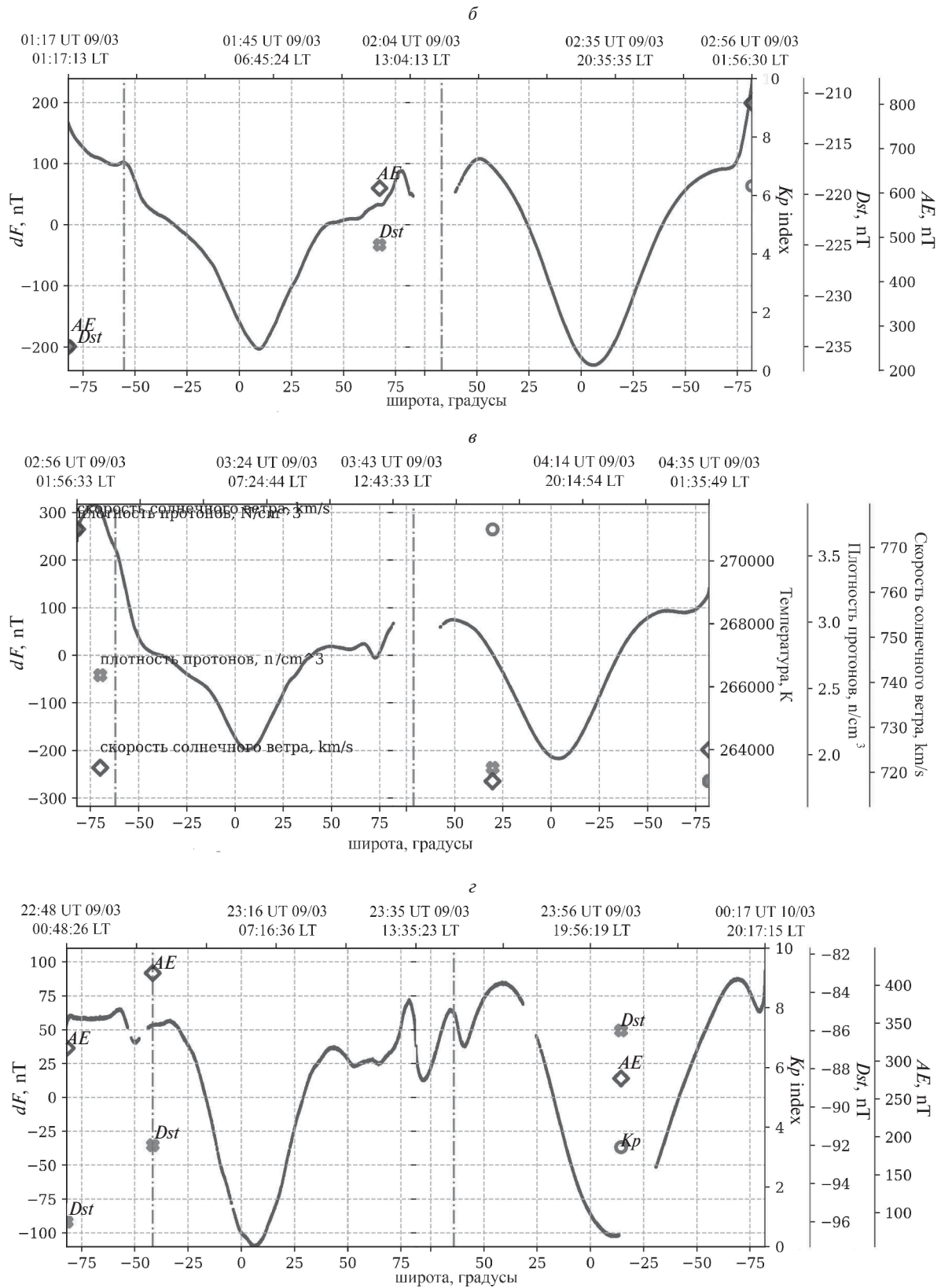


Рис. 8 (продолжение). Характер изменения возмущенной составляющей поля dF по данным спутника OGO-6: (б) — за виток d2, (в) — за виток d3, (г) — за виток d4. Обозначения аналогичны рис. 6.

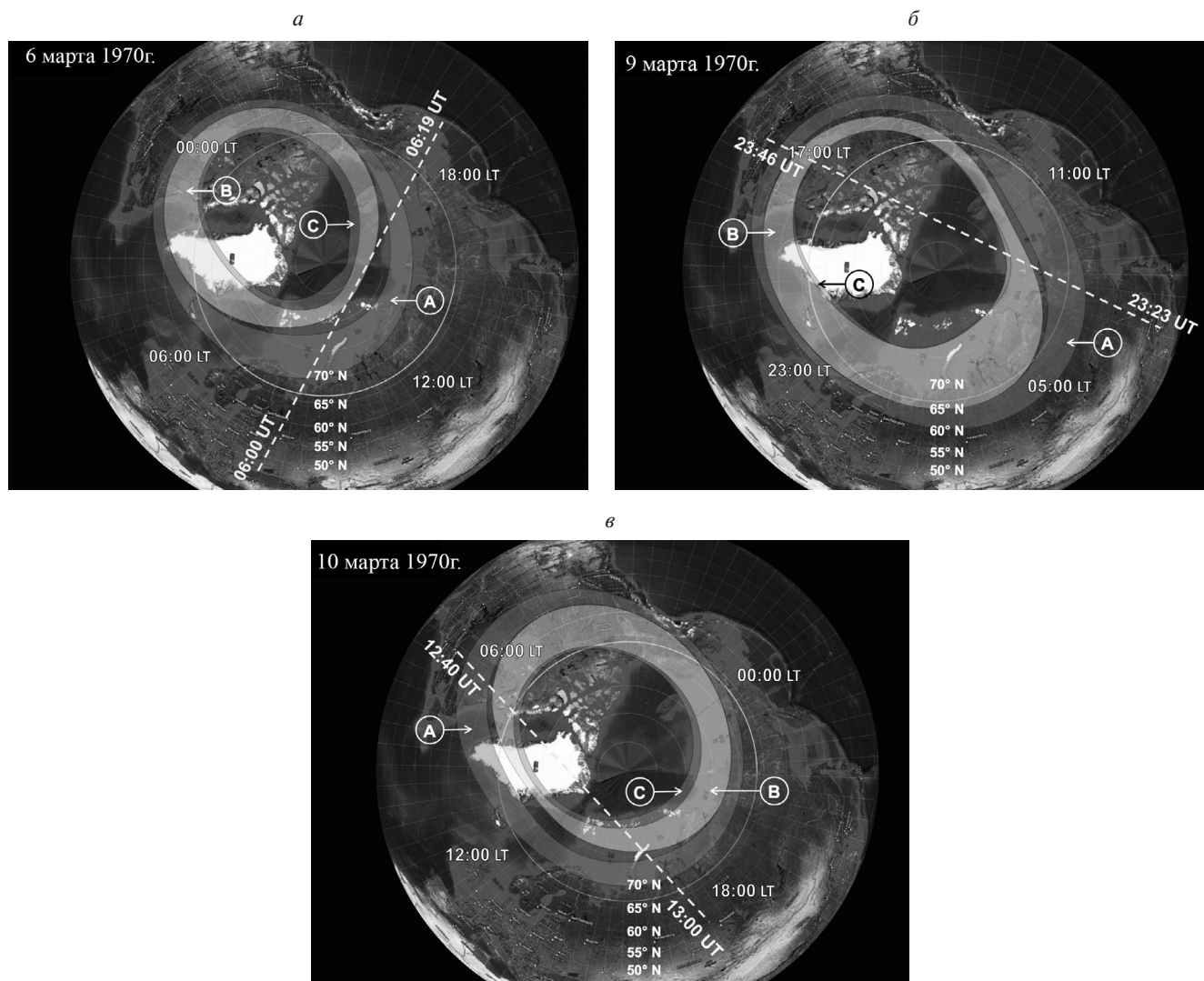


Рис. 9. Области диффузных высыпаний (А), аврального овала (В) и мягких диффузных высыпаний (С): (а) — на 06:00 UT 6 марта 1970 г. (~виток q1), (б) — на 23:00 UT 9 марта 1970 г. (~виток d4), (в) — на 12:00 UT 10 марта 1970 г. (~виток q2). Пунктирной линией показаны фрагменты траекторий спутника при пересечении полярной области и указаны временные отметки UT на их концах. Карты приведены в координатах “географическая широта”–“местное время”. Карты построены согласно усовершенствованной программной реализации модели авральных высыпаний АРМ.

собой различные модели овала, что повышает эффективность интерпретации результатов моделирования. Кроме этого, разработанная новая виртуальная модель обеспечивает автоматизированное построение зон авральных высыпаний в соответствии с моделью АРМ в режиме квази-реального времени (т.е. на момент поступления актуальных исходных данных).

Исходная же модель АРМ была сформирована по базе данных о геомагнитной активности, представленных значениями Dst - и AL -индекса, которые были получены в результате прямых наблю-

дений характеристик высыпающихся частиц спутниками серии DMSP. Модель позволяет выделять следующие авральные области с различными характеристиками высыпающихся частиц: диффузная авральная зона, авральный овал и мягкие диффузные высыпания. Диффузная авральная зона (DAZ) — область диффузных осадков, расположенная к экватору от аврального овала и пространственно совпадающая с зоной диффузных полярных сияний. Авральный овал (AOP) — область структурированных высыпаний, экваториальная граница которой пространственно совпадает с экваториальной грани-

цей овала дискретных авроральных форм. Мягкие диффузные высыпания (SDP) — область мягких диффузных осадков к полюсу от области АОР. На рис. 9 представлены карты в полярной проекции, отражающие морфологию и границы аврорального овала до, во время и после бури 8–9 марта 1970 г.:

1. 06:00 UT 6 марта (~ виток q1);
2. 23:00 UT 9 марта (~ виток d4);
3. 12:00 UT 10 марта (~ виток q2).

Стремительный рост возмущенности dF в районе 70° N на восходящей траектории спутника на витке d4 (рис. 8з) соответствует пересечению экваториальной границы электроджета в районе 07:30 LT при движении спутника к полюсу (рис. 9б). При этом максимум плотности электроджета (два пика dF в районе 80° N и 65° N на рис. 8з) располагается ближе к приполюсной границе овала, которую спутник пересек дважды (рис. 9б). Спад локализованных возмущений dF в районе 60° N на нисходящей траектории спутника соответствует повторному пересечению экваториальной границы полярного электроджета. Во время витка q1, который предшествовал магнитной буре, геомагнитная активность была минимальной, что отразилось на наиболее сжатой области аврорального овала (рис. 9а). Во время витка q2, который пришелся на заключительную фазу бури, область аврорального овала несколько расширена (рис. 9в) ввиду остаточных эффектов геомагнитной активности. Им соответствуют все еще повышенные по модулю значения Dst -индекса и сохраняющиеся небольшие флуктуации AE -индекса.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Несомненно, наземные наблюдения магнитного поля крайне важны и ценны, в первую очередь, благодаря длительности и непрерывности наблюдений, а также фиксированному положению обсерваторий на земной поверхности (для отдельных исследований это имеет решающее значение) [Соловьев, 2023; Love and Chulliat, 2013]. Однако, спутниковые данные также имеют ряд преимуществ, чем эффективно дополняют наземные наблюдения. Например, момент пересечения интересующих границ изменчивых токовых структур в ионосфере в заданном интервале времени наиболее точно детектируется именно по спутниковым данным — в этот интервал наземный пункт может находиться далеко от исследуемого региона, в то время как низкоорбитальный спутник совершает полный виток примерно за 1.5 часа. Спутниковые данные также являются основным источником информации о плотности

продольных токов. За счет глобального покрытия спутниковые наблюдения наилучшим образом описывают динамику главного МПЗ.

Результаты изучения морфологии геомагнитной активности по спутниковым данным дают все основания связать большие пространственные градиенты возмущенной составляющей магнитного поля, наблюдаемые только в высоких широтах, с сигналами полярных электроджетов и границами аврорального овала. Это дает возможность определения положения полярного электроджета, которое качественно удовлетворяет наблюдаемым вариациям магнитного поля по спутниковым данным. В целом, наблюдается высокая корреляция между возмущенностью МПЗ, рассчитанной по спутниковым данным, параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля и индексами геомагнитной активности, которые вычисляются по данным наземных обсерваторий. В частности, в спутниковых данных хорошо идентифицируются депрессия магнитного поля в результате усиления кольцевого тока магнитосферы, фокус экваториального электроджета и токовые системы, сопутствующие активизации электромагнитных процессов в полярной ионосфере в результате магнитосферно-ионосферного взаимодействия.

Сигнал экваториального электроджета, обнаруженный при пролетах спутника над всеми долготными секторами экватора на дневной стороне, может быть использован для точного определения положения геомагнитного экватора на высоте ионосферы. В свою очередь, эта информация может быть использована для минимизации так называемого “эффекта Бакуса” при построении точных моделей главного МПЗ только по скалярным данным. Все эти обстоятельства подтверждают высокую ценность скалярных наблюдений МПЗ спутникового базирования при отсутствии векторных данных, а также демонстрируют высокую эффективность использования измерений, полученных более полувека назад.

Исторические спутниковые данные предоставляют широкие возможности не только для ретроспективного анализа отдельных геомагнитных бурь, но также позволяют проводить ретроспективную верификацию исторических моделей главного МПЗ, базирующихся в основном на данных наземных наблюдений. При должном учете “эффекта Бакуса”, связанного с неоднозначным восстановлением полного вектора МПЗ в результате инверсии только скалярных наблюдений [Stern and Bredekamp, 1975], такие данные также позволяют строить глобальные аналитические модели МПЗ [Soloviev and Peregoudov, 2022].

В результате, с привлечением дополнительно данных наземных обсерваторий, появляется возможность получения более точной оценки прогнозов векового хода согласно разным моделям.

5. ВЫВОДЫ

Благодаря усилиям [Krasnoperov et al., 2020] впервые появился доступ к цифровым массивам исторических спутниковых наблюдений полной напряженности МПЗ за 1964 г. (Космос-49) и 1970 г. (Космос-321) и появилась возможность их всестороннего анализа. На сегодня эти данные наряду с наблюдениями спутников серии OGO представляют собой самые ранние спутниковые наблюдения геомагнитного поля, доступные в цифровом формате. В работе представлен анализ сильной геомагнитной бури 8–9 марта 1970 г. по скалярным данным, полученным за этот период спутниковыми миссиями Космос-321 и OGO-6. С учетом непродолжительного срока активного существования подобных спутников того времени рассматриваемые данные, запечатлевшие сильную бурю на фазе максимума 20-го цикла солнечной активности, являются уникальными. По этим данным был отчетливо выделен сигнал экваториального электроджета в виде резкого отрицательного пика возмущенной составляющей полной напряженности поля (dF) вблизи геомагнитного экватора. Во время главной фазы бури в области приэкваториальных широт значения dF опускались до ~ -300 нТл и соответствовали пиковому значению Dst -индекса, тем самым, отражая усиление кольцевого тока магнитосферы.

Точные знания о конфигурации аврорального овала на момент пересечения спутником полярной области дают возможность более детального анализа локализованных возмущений магнитного поля на высоких широтах. Для этих целей была разработана современная программная реализация модели авроральных высыпаний АРМ, позволяющая восстанавливать структуру авроральных высыпаний. Разработанный продукт обеспечивает автоматизированное построение зон авроральных высыпаний в соответствие с моделью АРМ в режиме квазиреального времени. По аналогичной парадигме ранее был реализован сервис прогноза полярных сияний (<https://auroga-forecast.ru/>) (с 4 августа 2020 г. по настоящее время) на базе модели OVATION Prime [Newell et al., 2014], который был хорошо воспринят широким кругом научной общественности [Воробьев и др., 2020, 2022; Vorobev et al., 2020, 2023]. Модель АРМ в данном случае прошла тот

же путь, в результате чего на ее базе была построена новая виртуальная модель авроральных высыпаний. С использованием разработанной системы были определены пересечения спутником OGO-6 экваториальной и полярной границ аврорального овала после активизации суббуревой активности, в результате чего были выделены более точно эффекты полярных электроджетов по спутниковым данным.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность сотрудникам Полярного геофизического института, а именно д.ф.-м.н. Воробьеву В.Г. и к.ф.-м.н. Ягодкиной О.И., результаты многолетних исследований которых позволили разработать и использовать в настоящем исследовании продвинутую версию модели авроральных высыпаний. Авторы также благодарны рецензентам за детальное изучение рукописи и полезные замечания. В работе использовались данные и сервисы ЦКП “Аналитический центр геомагнитных данных” Геофизического центра РАН (<https://ckp.gcras.ru/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках государственных заданий ГЦ РАН (Белов И.О., Воробьев А.В. и Сергеев В.Н.) и ИФЗ РАН (Соловьев А.А.), утвержденных Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воробьев А.В., Пилипенко В.А., Решетников А.Г., Воробьева Г.Р., Белов М.Д. Веб-ориентированная визуализация геофизических параметров в области аврорального овала // Научная визуализация. Т. 12. № 3. С. 108–118. 2020. <https://doi.org/10.26583/sv.12.3.10>
- Воробьев А.В., Соловьев А.А., Пилипенко В.А., Воробьева Г.Р. Интерактивная компьютерная модель для прогноза и анализа полярных сияний // Солнечно-земная физика. Т. 8. № 2. С. 93–100. 2022. <https://doi.org/10.12737/szf-82202213>
- Долгинов Ш.Ш., Жигалов Л.Н., Струнникова Л.В., Фельдштейн Я.И., Черевко Т.Н., Шарова В.А. Магнитная буря 8–10 марта 1970 г. по наблюдениям на спутнике “Космос-321” и на поверхности Земли. I. Морфология возмущения // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 12. № 6. С. 1046–1058. 1972.
- Долгинов Ш.Ш., Козлов А.Н., Колесова В.И. и др. Каталог измеренных и вычисленных значений модуля напряженности геомагнитного поля вдоль орбит спутника “Космос-321”. М.: Наука, 179 с. 1976.
- Долгинов Ш.Ш., Наливайко В.И., Тюрмин А.В., Чинчевой М.М., Бродская Р.Е., Злотин Г.Н., Кикнадзе И.Н., Тюрмина Л.О. Каталог измеренных и вычисленных значений модуля напряженности геомагнитного поля

вдоль орбит спутника “Космос-49”. 24 октября – 4 ноября. Ред. В.П. Орлов. М.: ИЗМИРАН (в 3-х томах). 1967.

– Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Лодкина И.Г., Николаева Н.С. Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям // Космич. исслед. Т. 45. № 1. С. 3–11. 2007. <https://doi.org/10.1134/S0010952507010017>

– Соловьев А.А. Некоторые задачи геомагнетизма, решаемые по данным наземных и спутниковых наблюдений // Геология и геофизика. Т. 64. № 9. С. 1330–1356. 2023. <https://doi.org/10.15372/GiG2023112>

– Alken P., Thébaud E., Beggan C.D. et al. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation // Earth, Planets and Space. V. 73. № 49. 2021. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>

– Cain J.C., Hendricks S.J., Hudson W.V., Langel R.A. A proposed model for the international geomagnetic reference field-1965 // J. Geomagn. Geoelectr. V. 19. № 4. P. 335–355. 1967. <https://doi.org/10.5636/jgg.19.335>

– Formisano V. On the March 7–8, 1970, event // J. Geophys. Res.:Space Physics. V. 78. № 7. P. 1198–1202. 1973. <https://doi.org/10.1029/JA078i007p01198>

– Friis-Christensen E., Lühr H., Hulot G. Swarm: A constellation to study the Earth’s magnetic field // Earth, Planets and Space. V. 58. № 4. P. 351–358. 2006. <https://doi.org/10.1186/BF03351933>

– Holme R., James M.A., Lühr H. Magnetic field modelling from scalar-only data: Resolving the Backus effect with the equatorial electrojet // Earth, Planets and Space. V. 57. № 12. P. 1203–1209. 2005. <https://doi.org/10.1186/BF03351905>

– Jackson J.E., Vette J.I. OGO Program Summary. Washington, D.C., USA: NASA, 330 p. 1975.

– Khokhlov A., Hulot G., Le Mouél J.-L. On the Backus effect—I // Geophys. J. Int. V. 130. № 3. P. 701–703. 1997. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb01864.x>

– Kozyreva O.V., Pilipenko V.A., Soloviev A.A., Engebretson M. J. Virtual magnetograms - a tool for the study of geomagnetic response to the solar wind/IMF driving // Russ. J. Earth Sci. V. 19. № 2. 2019. <https://doi.org/10.2205/2019ES000654>

– Krasnoperov R., Peregoudov D., Lukianova R., Soloviev A., Dzeboev B. Early Soviet satellite magnetic field measurements in the years 1964 and 1970 // Earth Syst. Sci. Data. V. 12. № 1. P. 555–561. 2020. <https://doi.org/10.5194/essd-12-555-2020>

– Love J.J., Chulliat A. An international network of magnetic observatories // Eos. V. 94. № 42. P. 373–374. 2013. <https://doi.org/10.1002/2013EO420001>

– Lühr H., Maus S., Rother M. Noon-time equatorial electrojet: its spatial features as determined by the CHAMP satellite // J. Geophys. Res. V. 109. № A1. 2004. <https://doi.org/10.1029/2002JA009656>

– Manda M. Magnetic satellite missions: where have we been and where are we going? // Cr. Geoscience. V. 338. № 14–15. P. 1002–1011. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.05.011>

– Meng X., Tsurutani B.T., Mannucci A.J. The solar and interplanetary causes of superstorms (minimum Dst $\leq$ –250 nT) during the space age // J. of Geophys. Res.: Space Physics. V. 124. № 6. P. 3926–3948. 2019. <https://doi.org/10.1029/2018JA026425>

– Newell P.T., Liou K., Zhang Y., Sotirelis T., Paxton L.J., Mitchell E. J. OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels // Space Weather. V. 12. № 6. P. 368–379. 2014. <https://doi.org/10.1002/2014SW001056>

– Olsen N., Hulot G., Sabaka T.J. Measuring the Earth’s Magnetic Field from Space: Concepts of Past, Present and Future Missions // Space Sci. Rev. V. 155. P. 65–93. 2010. <https://doi.org/10.1007/s11214-010-9676-5>

– Petrov V.G., Krasnoperov R.I. The aspects of K-index calculation at Russian Geomagnetic Observatories // Russ. J. Earth Sci. V. 20. № 6. 2020. <https://doi.org/10.2205/2020ES000724>

– Skuridin G.A. Mastery of outer space in the USSR, 1957–1967 (translation of “Osvoyeniye kosmicheskogo Prostranstva v SSSR, 1957–1967”, Moscow, “Nauka” Press, 1971). Washington, D.C., USA: NASA. 1975.

– Soloviev A.A., Peregoudov D.V. Verification of the geomagnetic field models using historical satellite measurements obtained in 1964 and 1970 // Earth, Planets and Space. V. 74. № 187. 2022. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01749-5>

– Stern D.P., Bredekamp J.H. Error enhancement in geomagnetic models derived from scalar data // J. Geophys. Res. V. 80. № 13. P. 1776–1782. 1975. <https://doi.org/10.1029/JA080i013p01776>

– Vorobev A.V., Pilipenko V.A., Krasnoperov R.I., Vorobeva G.R., Lorentzen D.A. Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the “virtual globe” technology // Russ. J. Earth Sci. V. 20. № 6. 2020. <https://doi.org/10.2205/2020ES000721>

– Vorobev A.V., Soloviev A.A., Pilipenko V.A., Vorobeva G.R. Internet application for interactive visualization of geophysical and space data: approach, architecture, technologies // Journal of the Earth and Space Physics. V. 48. № 4. P. 151–160. 2023. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.350281.1007467>

– Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Yu.V. Auroral Precipitation Model and its applications to ionospheric and magnetospheric studies // J. Atmos. Sol.- Terr. Phys. V. 102. P. 157–171. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.007>

– Yamazaki Y., Maute A. Sq and EEJ – A Review on the Daily Variation of the Geomagnetic Field Caused by Ionospheric Dynamo Currents // Space Sci. Rev. V. 206. P. 299–405. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11214-016-0282-z>

Study of Geomagnetic Disturbances from Satellite Data in Magnetic Storm on 8–9 March 1970

A. A. Soloviev^{1, 2, *}, I. O. Belov^{1, **}, A. V. Vorobev^{1, 3, ***}, V. N. Sergeyev^{1, ****}

¹*Geophysical Center RAS,*

²*Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,*

³*Ufa University of Science and Technology*

**e-mail: a.soloviev@gcras.ru*

***e-mail: i.belov@gcras.ru*

****e-mail: geomagnet@list.ru*

*****e-mail: v.sergeev@gcras.ru*

In this study, we consider historical geomagnetic satellite data obtained during a strong magnetic storm on March 8–9, 1970. In addition to the data of the Soviet satellite Kosmos-321, data from the American satellite OGO-6, which performed geomagnetic measurements at the same time, were used. We analyzed time variations of external magnetic fields recorded in satellite and ground-based observations of the magnetic field. The research also gave impetus to the creation of the improved software implementation of the auroral oval model APM, which enables reconstruction of its position and precipitation intensity in both the past and near real time. The magnetic variations originating in the near-Earth space from various sources were identified. In particular, we revealed the signatures of the storm-time ring current and equatorial and auroral electrojets. The paper highlights the enduring value of historical data of magnetic field observations stored in data centers and continuously digitized by their staff.

Keywords: external magnetic field, disturbance morphology, auroral oval modelling, satellite observations, historical data.