

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-3-164-175>

УДК 551.510.535

ИОНОСФЕРНАЯ БУРЯ 25/26 МАЯ 1967 Г. КАК МОДЕЛЬ ОТКЛИКА ИОНОСФЕРЫ НА ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Г. И. Гордиенко, Ю. Г. Литвинов, М. Ю. Жиганбаев*

ТОО «Институт ионосферы», Алматы, Казахстан

* E-mail для контактов: zhiganbayev@ionos.kz

Представлены результаты исследования ионосферных эффектов экстремальной геомагнитной бури 25/26 мая 1967 г. ($Dst = -387$ нТ), полученные с использованием ионосферных данных, измеренных на пяти ионосферных станциях, расположенных в регионе Средней Азии. Геомагнитная буря с начальной фазой продолжительностью примерно 9 часов, началась в ~ 20 UT 25 мая, что для рассматриваемого региона соответствует ночному времени (в 00:01 LT) 26 мая.

Отрицательное ионосферное возмущение продолжительностью порядка 28 часов, начавшееся на всех рассматриваемых станциях во время начала главной фазы геомагнитной бури, характеризовалось понижением критических частот слоя F2 ионосферы $foF2$ в $\sim 2,2$ раза по сравнению с уровнем $foF2$ в спокойных геомагнитных условиях. Наблюдавшееся во время отрицательной фазы ионосферной бури «условие G», когда $foF2 \leq foF1$, продолжалось порядка 11 часов и указывало на значительные изменения в параметрах термосферы, ответственных за формирование F-области в средних широтах.

Аномальное образование ночного E-слоя, наблюдаемое на всех ионосферных станциях, обсуждается в рамках физического механизма выпадения энергичных частиц на средних и низких широтах.

Повышенные значения и wave-like вариации критических частот $foF2$, наблюдаемые во время фазы восстановления геомагнитной бури, интерпретируются с точки зрения обусловленности их перемещающимися атмосферными возмущениями.

Событие *black out*, связанное с полным поглощением зондирующего сигнала, наблюдаемое на станциях в регионе Средней Азии и Дальнего Востока 28 мая, ассоциируется с воздействием на нижнюю ионосферу потока солнечных космических лучей высокой интенсивности, зарегистрированных в этот период.

Ионосферная буря 25/26 мая может служить моделью отклика ионосферы на экстремальное возмущение магнитного поля Земли.

Ключевые слова: ионосфера, ионосферная буря, экстремальная геомагнитная буря.

ВВЕДЕНИЕ

Влияние солнечной радиации, активных процессов на Солнце на состояние околоземного космического пространства уже несколько десятилетий является предметом интенсивных исследований с целью понимания механизмов воздействия Солнца на процессы в атмосфере Земли [1, 2], которая в настоящее время является средой обитания не только космических аппаратов различного назначения (обеспечение радиосвязи, навигации и т.п.), но и человека. Особое место в этих исследованиях занимает изучение явлений, связанных с экстремальными событиями на Солнце, такими как солнечные вспышки, выбросы корональных масс, сопровождающиеся длительными периодами повышенной геомагнитной активности, выпадениями энергичных частиц, что, в свою очередь, вызывает «драматические» изменения в термосфере/ионосфере и оказывает влияние на высокотехнологичные наземные и космические системы [3, 4]. Известны случаи, когда мощной вспышкой, направленной в сторону Земли, вполне достаточно, чтобы устроить настоящий коллапс на планете: ухудшение работы навигационной системы GPS в условиях геомагнитных возмущений [5, 6], отключение электроэнергии в Квебеке (Канада) во время шторма 13–15

марта 1989 г. [7], отключение электроэнергии 30 октября 2003 г. на юге Швеции [8], уничтожение тридцати восьми спутников Starlink во время геомагнитной бури 4 февраля 2022 г. со значительными финансовыми и другими последствиями [9]. Эти случаи требуют дальнейшего изучения экстремальных событий с целью лучшего понимания особенностей их развития на разных стадиях.

В этом исследовании сделана попытка обратиться к событию 55-летней давности, которое едва не привело к ядерной войне [10], к солнечным вспышкам в мае 1967 года, и описать их геомагнитные и ионосферные эффекты в регионе Средней Азии, которые ранее не изучались. Вспышки были вызваны процессами в активной области № 8818, которая появилась на восточном лимбе Солнца 18 мая, прошла через центральный меридиан 25 мая и исчезла на западном лимбе 31 мая. Как результат, серия геомагнитных возмущений была зарегистрирована во второй половине мая, наиболее интенсивной из которых была геомагнитная буря 25–26 мая [11].

В работе [12] авторами представлены результаты подробного анализа особенностей космической погоды, связанных с эффектами солнечных вспышек 23 мая 1967 года. Первая вспышка (вспышка класса M3)

произошла в 18:17 UT, вторая рентгеновская вспышка в 18:46 UT (вспышка класса X6), третья вспышка из той же активной области (вспышка класса X2) в 19:53 UT. Сообщалось об увеличении интенсивности потока энергичных протонов (>12 МэВ), наблюдавшегося после 21 UT на OGO-3, что привело к заключению, что все вспышки были длительными рентгеновскими событиями и связаны с выбросами корональных масс, которые спровоцировали серию геомагнитных возмущений, наиболее интенсивной из которых была геомагнитная буря, начавшаяся 25 мая ($DST = -387$ nT), что нарушило американскую радиосвязь почти на неделю и работу радаров в полярных широтах северного полушария [10].

Целью данной работы является исследование отклика среднеширотной F-, E- и D-области ионосферы на воздействие процессов, связанных с возмущением геомагнитного поля в период 25–26 мая 1967 года. Работа выполняется с использованием данных вертикального радиозондирования ионосферы на станциях среднеазиатского региона.

1. ДАННЫЕ И ИЗМЕРЕНИЯ

Влияние солнечного события в мае 1967 года на ионосферу средних широт изучается по данным наземных измерений, проведенных сетью ионосферных станций Средней Азии (таблица 1, $n = 1-5$).

Таблица 1. Координаты ионосферных станций

n	Станция		Географическая широта (N)	Географическая долгота (E)	Геомагнитная широта (N)	Геомагнитная долгота (E)	Меридиан часового пояса
	код	название					
1	KR250	Karaganda	49,82	73,08	40,34	149,76	75E/05
2	NK246	Novokazalinsk	45,76	62,12	37,58	139,55	60E/04
3	AA343	Alma-Ata	43,25	76,92	33,47	151,88	75E/05
4	TQ241	Tashkent	41,33	69,62	32,32	145,19	75E/05
5	AS237	Ashkhabad	37,90	58,30	30,36	134,47	60E/04
6	SD266	Salekhard	66,50	66,50	57,36	149,67	60E/04
7	TK356	Tomsk	56,50	84,90	45,99	160,62	90E/06
8	IR352	Irkutsk	52,50	104,00	41,22	175,48	105E/07

Для каждой станции в таблице 1 приведены код станции, географические и дипольные координаты (северная широта и восточная долгота), меридиан часового пояса и разница во времени между UT и LT в местах расположения станций ($\lambda/\Delta T$) [13]. Для исследования используются данные наземного радиозондирования ионосферы foF2, foF1, foE, foEs (часовые значения критических частот F2-, F1-, E- и Es-слоев), h'F (минимальная высота F-слоя), fmin (самая низкая частота, на которой начинают наблюдаться отражения от ионосферы и значения которой зависят от уровня поглощения зондирующего сигнала в области D (высоты 60–90 км)). Следует отметить, что данные для области D (т. е. fmin) очень ограничены, что связано с тем, что отражения от слоя D при

вертикальном зондировании регистрируются редко из-за большого поглощения, вызванного высокой частотой столкновений ионов с нейтральными частицами на данных высотах. Тем не менее, эффект поглощения проявляется на ионограмме, и проявляется как увеличение значений fmin. Сложная зависимость fmin от технических характеристик ионозонда делает невозможным использование этого параметра ионосферы для измерения абсолютных значений поглощения радиоволн, но как качественная характеристика, как индикатор поглощения радиоволн, параметр fmin широко применяется [14–16].

Для Казахских станций (AA, НК, КР) используется архив ионосферных данных Института ионосферы (Алматы, Казахстан), для других станций данные получены через сайт https://www.sws.bom.gov.au/World_Data_Centre/1/3/.

Особенности геомагнитных вариаций, наблюдаемые в период мая 1967 года, оценивались по вариациям H-составляющей геомагнитного поля (данные геомагнитной обсерватории «Алма-Ата») и Dst-индекса, представленного на сайте <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1 Геомагнитная буря 25/26 мая 1967 г.

Рисунок 1 представляет вариации горизонтальной компоненты геомагнитного поля H и Dst-индекса за период 21–31 мая 1967 г. включая геомагнитную бурю 25/26 мая. Для удобства обсуждения период возмущения магнитного поля разделим на три периода, на фазы 1, 2 и 3 (см. рис. 1, верхняя панель).

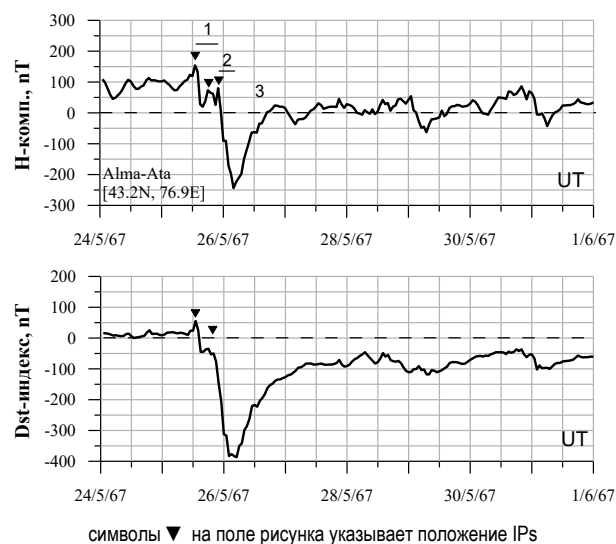


Рисунок 1. Вариации H, Dst-индекса, в период 24–31 мая 1967 г.

Первая (1) начальная фаза IP (Initial Phase) или SSC (Sudden Storm Commencement) характеризуется всплесками (осциллирующими вариациями) H-составляющей (IP1, IP2, IP3) с пиковыми значениями H между 75–155 nT, относится ко времени между IP1 и IP3 и длится порядка 9-ти часов, то есть с 13:00 UT

(18:00 LT) до 22:00 UT (03:00 LT) 25-го мая. Фаза (2), главная фаза, начинается в 22:00 UT 25-го мая (03:00 LT, 26-го мая), характеризуется резким понижением значений Dst-индекса и H -составляющей, пиковые значения которых (-387 nT и -250 nT соответственно) наблюдаются между 02:00 UT и 04:00 UT (07:00–09:00 LT) 26-го мая. То есть, главная фаза геомагнитной бури длится порядка шести часов, после чего начинается фаза восстановления состояния геомагнитного поля (фаза 3). Рисунок 1 показывает, что на фазах развития геомагнитной бури вариации H -составляющей и Dst-индекса, практически, синхронны. Однако восстановление спокойного уровня Dst-индекса происходит гораздо медленнее относительно H -составляющей.

Следует сказать, что ещё два геомагнитных возмущения отмечаются в последнюю неделю мая, которые являются результатом активности той же области № 8818 на Солнце [11]. Первое началось во время восстановления бури 25–26 мая, по этой причине время начала бури установить не представляется возможным, но заметны внезапные всплески активности с 27-го до конца 28-го мая, после чего развилась главная фаза умеренной геомагнитной бури с пиковым значением H -составляющей порядка -70 nT (рисунок 1, верхняя панель), значение Dst-индекса в это время составляли порядка -120 nT (рисунок 1, нижняя панель). Как следует из рисунка 1, аналогичная ситуация сложилась и на период 30–31 мая.

2.2 Ионосферные эффекты геомагнитной бури 25–26 мая 1967 г.

2.2.1 Ионосферные эффекты в области F2

Рисунок 2 показывает ионосферные эффекты геомагнитной бури 25–26 мая, представленные вариациями часовых значений критических частот области F2 (сплошная линия) и F1 (символ ⊕) ионосферы, наблюдаемых на рассматриваемых ионосферных станциях (таблица 1) в период 21–31 мая 1967 г. Штриховая линия на рисунке указывает спокойные ионосферные условия, представленные медианными значениями foF2med. Стрелки на поле рисунка указывают положение внезапных всплесков геомагнитной активности (IPs) на временной оси (ось X).

Первый ионосферный эффект это повышение критических частот foF2 на ~ 2 МГц (30%) относительно уровня медианных значений на начальной фазе развития геомагнитной бури (выделено кружком), что указывает на увеличение электронной концентрации в максимуме F2-слоя в это время, которая пропорционально связана с критическими частотами как $NmF2 = 1,24 \cdot 10^4 \cdot f^2$ (эл/см³). Повышенные значения foF2 наблюдались, практически, одновременно

на всех станциях с $\sim 14:00$ UT до $\sim 18:00$ UT ($\sim 19:00$ – $23:00$ LT) 25 мая и могут считаться аномальными, поскольку время их появления не предполагает воздействия ионизирующего воздействия Солнца.

Следующая особенность это, практически, одновременно пониженные значения критических частот foF2 между примерно 20:00 UT 25 мая и 24:00 UT 26 мая на всех станциях, что указывало на эффект отрицательной ионосферной бури. Продолжительность ионосферной бури составляет порядка 28 часов, начало бури ассоциируется с началом главной фазы геомагнитной бури и резким уменьшением значений Dst-индекса и H составляющей. Максимальный эффект ионосферной бури, составляющий примерно 2,5–2,7 МГц ($\sim 50\%$) в утренние часы (по местному времени) и примерно 4–5 МГц ($\geq 50\%$) в дневное время 26 мая, наблюдался примерно через 3 часа после начала резкого падения значений foF2. Таким образом, во время главной фазы геомагнитной бури дневные значения foF2 были примерно в два раза меньше дневных медианных значений foF2med, и были, практически, на уровне ночных значений foF2 для этого дня и значительно ниже фонового ночного уровня. Рисунок 2 показывает, что понижение значений foF2 привело к тому, что в максимуме развития отрицательной фазы ионосферной бури значения foF2 сравнялись с foF1 или, возможно, стали меньше. Таким образом, сформировались условия, которые согласно руководству URSI классифицируются как «условие G», когда вышележащий слой F2 экранируется нижележащим слоем F1, при этом на ионограммах вертикального зондирования ионосферы слой F2 «пропадает». В данном случае, в случае ионосферного возмущения 25/26 мая 1967 г., такие условия наблюдались в дневное время, продолжительность которых составляла порядка 11 часов, в частности для ст. Алма-Ата это период с 01:00 до 12:00 UT или с 06:00 до 17:00 LT (см. рисунок 2).

Расчёты возмущённой составляющей $\Delta foF2$, то есть разницы между возмущёнными и медианными значениями foF2, ещё раз показали, что отрицательная ионосферная буря наблюдалась, практически, одновременно на всех станциях, включая и более высокоширотные (Салехард, Томск, Иркутск), рассмотренные дополнительно (см. табл. 1, $n=6-8$), рисунок 3. Интенсивность возмущения составляла порядка 50–55%.

На фазе восстановления геомагнитной бури, в ионосфере наблюдается положительное возмущение 27 мая с foF2 до 30–40% и флуктуации критической частоты foF2 в последующие дни, что возможно связано с повышенной активностью геомагнитного поля в эти дни (см. раздел 2.1).

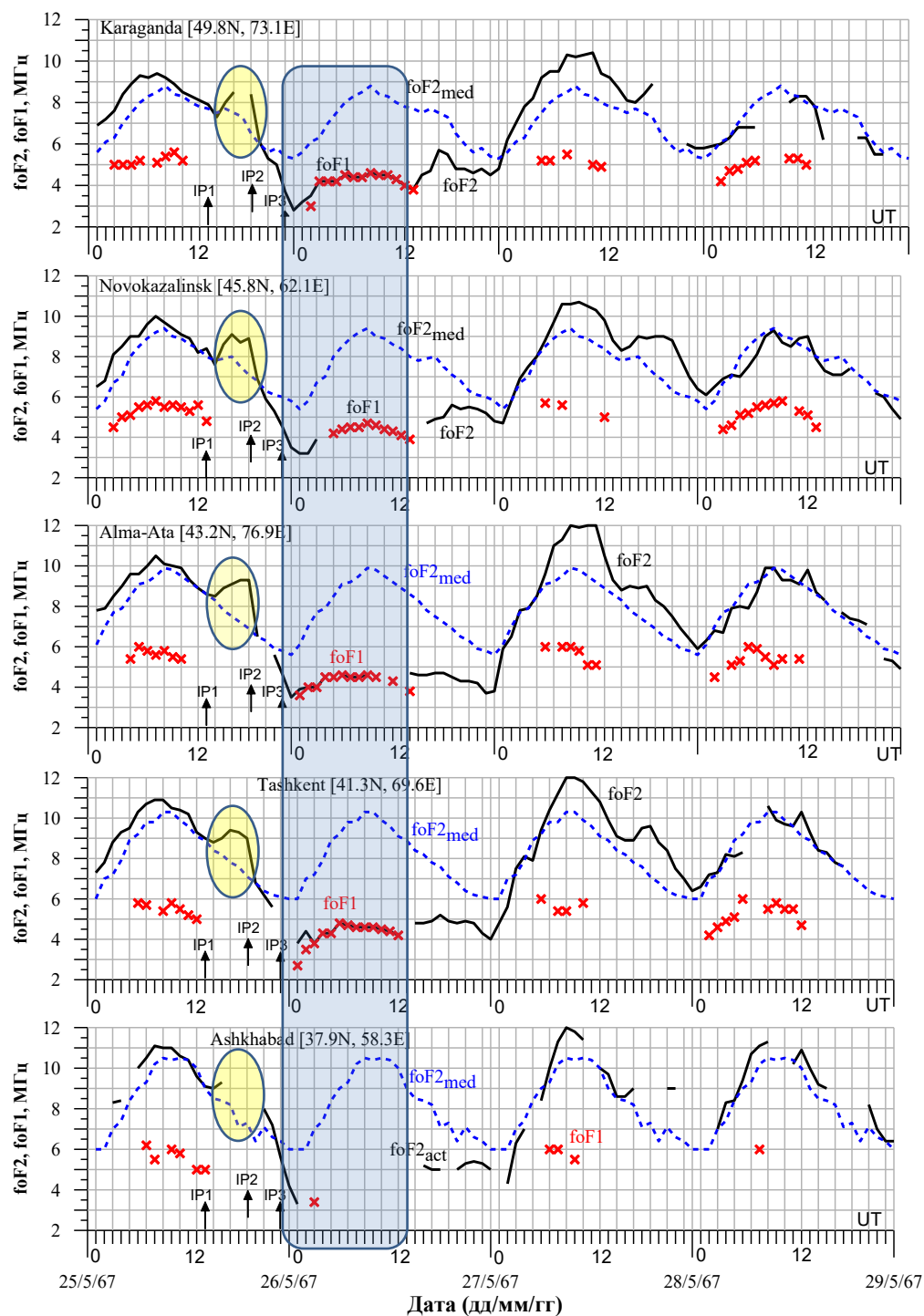


Рисунок 2. Вариации $foF2$, $foF2_{med}$, и $foF1$ для станций KR, NK, AA, TQ и AS за период 25-28 мая 1967 г. (стрелки указывают время IPs)

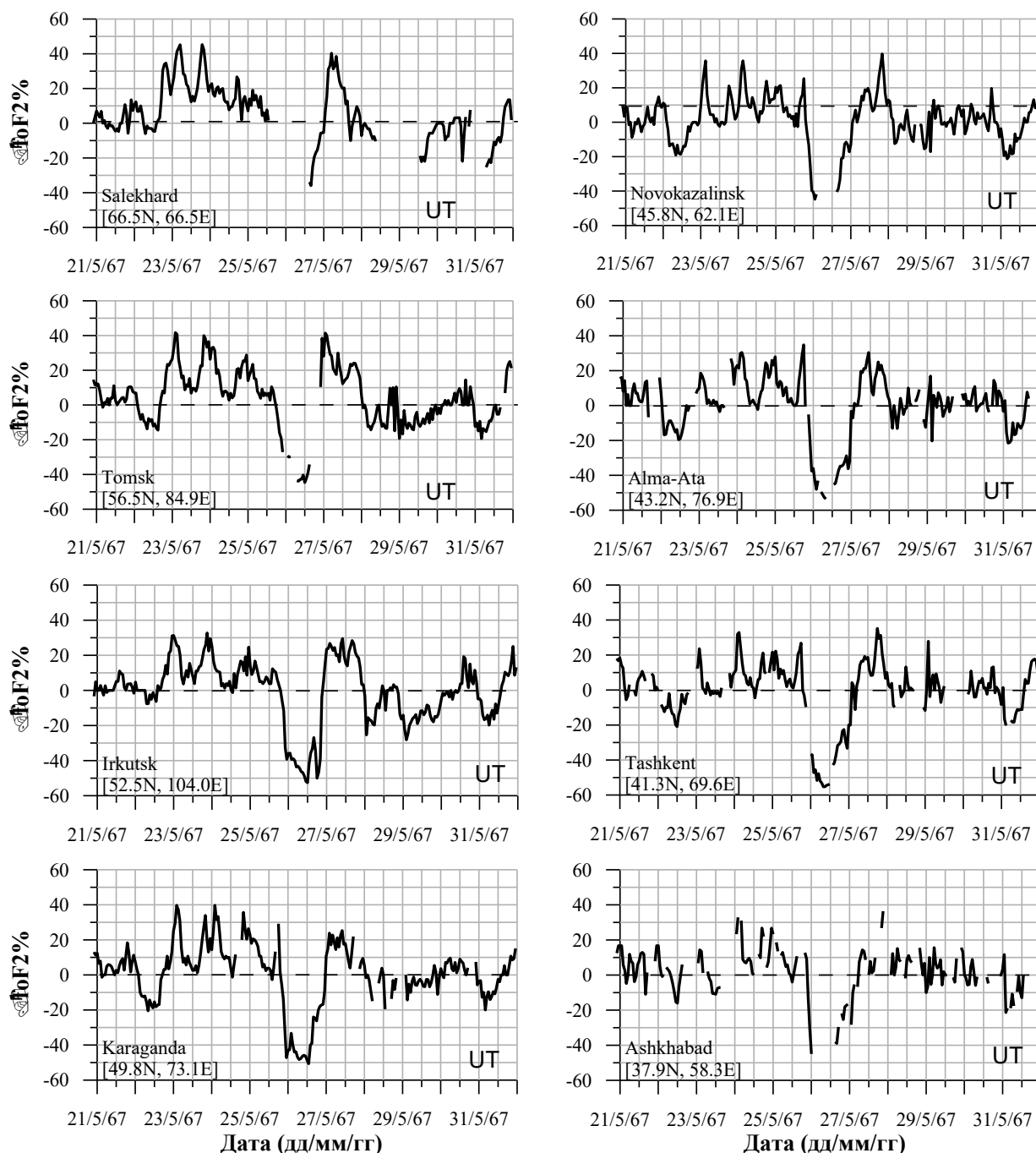


Рисунок 3. Вариации $\Delta foF2$ для станций SD, TK, IR, KR, NK, AA, TQ и AS за период 21–31 мая 1967

2.2.2 Ионосферные эффекты в D- и E-областях:

1. На всех рассматриваемых станциях 25 мая в одно и то же время наблюдались события внезапного увеличения минимальных частот отражения f_{min} (в 2 и более раз в дневное время, не показано здесь) что, скорее всего, связано с повышенным поглощением в области D ионосферы. Наибольшие значения f_{min} наблюдались в период максимальной интенсивности солнечных космических лучей в период между 08:00 UT и 14:00 UT 25 мая ([17], рисунок 1).

2. Увеличение критических частот слоя Es ионосферы 23–24 мая до 9–11 МГц, что ассоциируется с усилением потока рентгеновского излучения в этот период ([18], рисунок 1).

3. Появление аномального E-слоя с критической частотой $foE = 1,1–1,6$ МГц на всех станциях в ночное время (в 23:03 LT) 25–26 мая. Оценка ночных значений критической частоты слоя E с использованием Международного справочного ионосферного IRIPlas-2017 (<http://www.ionolab.org/>) показала, что для рассматриваемого региона в спокойных геомаг-

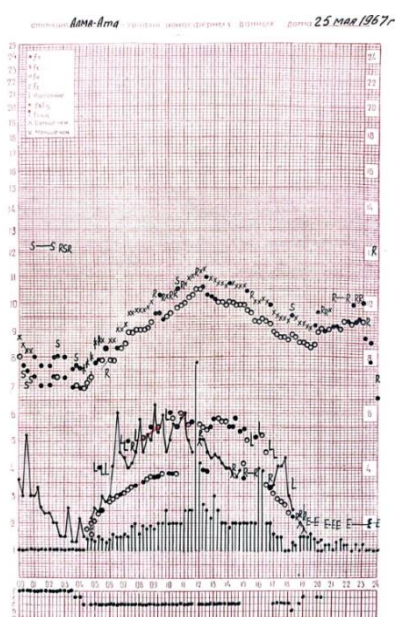
ИОНОСФЕРНАЯ БУРЯ 25/26 МАЯ 1967 Г. КАК МОДЕЛЬ ОТКЛИКА ИОНОСФЕРЫ НА ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

нитных условиях ночные значения f_oE составляют порядка 0,48 МГц, которые лежат за пределами регистрации ионозондом.

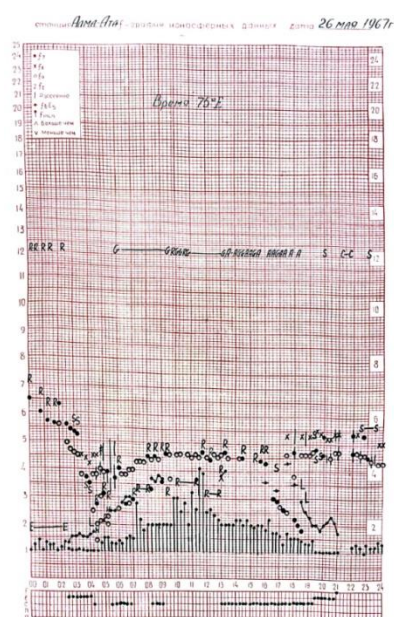
2.2.3 Вертикальное развитие ионосферной бури

Более детальный анализ ионосферного возмущения выполнен с использованием 15-минутных ионосферных данных, полученных на станции Алма-Ата и представленных в виде, так называемых, оригинальных f - и h -графиков, которые являются одним из эффективных видов отображения ионосферных параметров, полученных при обработке ионограмм вертикального зондирования ионосферы, рисунок 4.

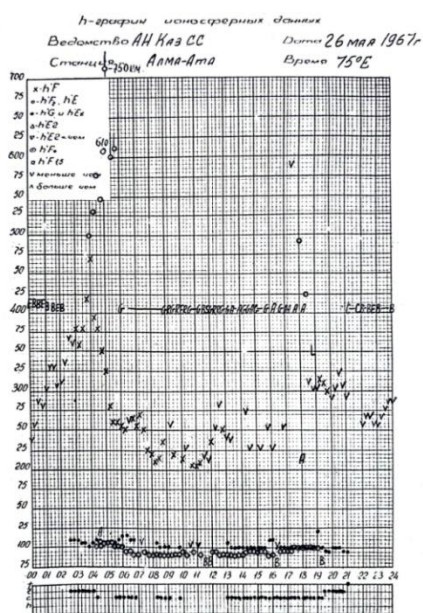
На f -графиках (рисунки 4а, б) указаны значения критических частот всех регулярно наблюдаемых слоев E, F1, F2: $f_oF2(\circ)$, $f_xF2(\times)$, $f_oF1(\circ)$, $f_oE(\circ)$, где символ “ $\circ$ ” относится к обыкновенной компоненте, символ “ $\times$ ” к необыкновенной. Значения частоты экранирования спорадическим слоем Es вышележащих слоев (fEs) представлены заполненными кружками с горизонтальной линией через них, значения минимальной частоты отражения f_{min} нанесены в виде заполненного кружка с вертикальной линией.



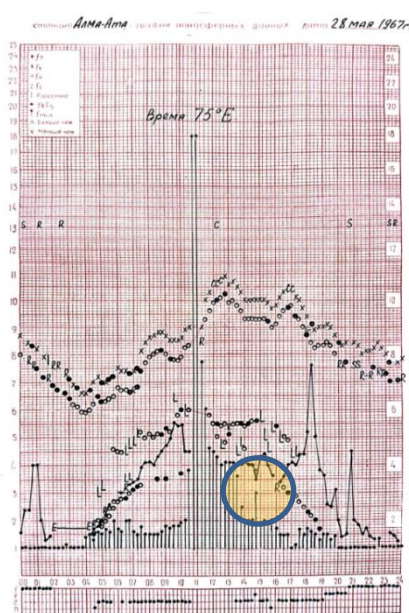
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4. f - и h -графики для 25–26 мая (а–в) и f -график для 28 мая (г) 1967 г.

Характеристики, нанесенные на h-графики (рисунок 4в), включают минимальные действующие высоты для обыкновенной компоненты всех регулярных слоев: h'F2 (○), h'F (×), h'E (○), h'Es (•). Стандартные f- и h-графики также имеют специальную панель, где указываются типы спорадических слоев Es (нижняя панель). Символ (●) на графиках относится к сомнительным (неопределенным) значениям, которые рассматриваются как «больше чем» (символ Λ) или «меньше чем» (символ V), описательные буквы указывают основную причину неопределенности или отсутствия числового значения из-за экранирующего спорадического слоя E (A), поглощения вблизи fmin (B), любой не ионосферной причины (C), помех (S), затухания вблизи критической частоты (R) и др.

Рисунки 4а, б демонстрируют наличие ночного E-слоя 25–26 мая (символ E), на что на ионограммах указывало групповое запаздывание на низкочастотном участке вышележащего слоя F. Показано, что ночной слой E появился в 19:00 LT 25 мая (в период начальной фазы геомагнитной бури) и наблюдался до 02:15 LT 26-го мая, в течение примерно 7 часов.

С 22:00 LT 25 мая, на фазе развития геомагнитной и ионосферной бури, наблюдается резкое понижение значений критической частоты слоя F с 8,8 МГц до 3,5 МГц в 04:00 LT 26 мая, сопровождавшееся появлением на короткое время отражений от регулярных слоев (E, F1, F2) и ростом действующих высот отражения h'F2 до 750 км в 05:15 LT и последующим (с 06:00 LT) «исчезновением» слоя F2 на ионограммах (символ “G” на f- и h'-графиках), рисунки 4б, в. Как упоминалось выше, это означает, что значения $foF2 \leq foF1$, что классифицируется как «условие G», которое в данном случае продлилось порядка 11 часов. Слой F2 появился в 17:30 местного времени на высоте h'F2 = 580 км с частотой foF2 = 4,6 МГц.

Рисунок 4в иллюстрирует пример повышенного поглощения зондирующего сигнала (увеличение значений fmin) 28 мая до полного поглощения и исчезновения отражений на ионограммах с 10:45 LT до 11:00 LT, что классифицируется как событие *black out*.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Исследовано влияние геомагнитной бури 25/26 мая 1967 г. на среднеширотную ионосферу с использованием данных наземного вертикального радиозондирования на пяти ионосферных станциях Среднеазиатского региона: Караганда, Новоказалинск, Алма-Ата, Ташкент и Ашхабад. Показано, что одной из особенностей состояния ионосферы в период бури, является хорошо выраженный рост foF2 (так называемый *pre-storm effect*), наблюдаемый в начальную фазу магнитной бури между 14 UT и 18 UT (между 19 LT и 23 LT) 25 мая, практически, одновременно на всех пяти станциях. Время наблюдения данной особенности исключает возможность воздействия усиления ионизирующего воздействия солнечного излучения, характеризуется значительным

ростом значений ар-индекса (с 56 nT в 12:00 UT до 226 nT в 15:00 UT) и положительными возмущениями в геомагнитном поле со всплесками ~80–150 nT в H-компоненте и 55 nT в Dst-индексе (рисунок 1).

Для ионосферного слоя F2 главной особенностью бури 25/26 мая является большая продолжительная (~28 ч) отрицательная буря, начавшаяся, практически, одновременно на всех пяти станциях во время начала развития главной фазы магнитной бури. Так уменьшение foF2 в ~2,2 раза (отношение дневных медианных значений foF2 (~10 МГц) к фактически наблюдаемым foF2 (~4,5 МГц)) на станции Алма-Ата 26 мая указывало на уменьшение NmF2 в ~5 раз.

Реакция ионосферы на изменения геомагнитной активности является предметом интенсивных исследований на протяжении многих лет. Прогресс и понимание этой темы представлены в ряде исследований [19–26]. Общеизвестно, что большое количество энергии, выделяемой в термосфере на высоких широтах во время геомагнитных возмущений, приводит к нагреву нижней части термосферы в зоне полярных сияний, повышению температуры нейтрального газа T и изменению нейтрального состава (уменьшению атомно-молекулярного отношения [O]/[N₂]). Оба эти фактора являются основной причиной уменьшения электронной концентрации (отрицательная фаза ионосферной бури) в высокоширотной ионосфере. Нагревание, в свою очередь, вызывает собственную циркуляцию, которая имеет тенденцию перемещать воздух по направлению к экватору в более низкие широты. Однако эта циркуляция может совпадать по направлению или быть обратной по отношению к фоновой циркуляции, которая определяется временем суток и сезоном. И в результате интерференция циркуляции, связанной с бурей (“*storm-time*”), и регулярной циркуляции определяет пространственное распределение отрицательной или положительной фазы в различные сезоны. Главная фаза геомагнитной бури мая 1967 г., наблюдаемая в регионе Средней Азии, произошла в ~03:00 LT 26 мая. Это соответствует летним ночным условиям для этого региона. Летом фоновая циркуляция большую часть дня направлена к экватору и, таким образом, совпадает с возмущенной составляющей циркуляцией, что благоприятствует проникновению воздуха с обедненным уровнем [O]/[N₂] и повышенной температурой (и, следовательно, отрицательной фазой ионосферной бури) в более низкие широты [19]. Более того, ночью фоновая и “*storm-time*” циркуляции направлены к экватору, поэтому обедненное отношение [O]/[N₂] может проникать в гораздо более низкие широты, чем днем. В целом представленная выше картина реакции ионосферы на геомагнитную бурю 25/26 мая 1967 г. (отрицательная фаза ионосферной бури в ночных и дневных условиях; высокие значения h'F и h'F2; существенное уменьшение значений foF2 (условие G)) соответствует схеме развития ионосферной

бури в летних дневных и ночных условиях, описанной выше.

Следующая аномалия – это появление на всех станциях ночного слоя E с критической частотой $f_oE = (1,1 \div 1,5)$ МГц, что соответствует $NmE = (1,5 \div 2,8) \cdot 10^4$ эл/см³. Используя модель IRI-Plus (www.ionolab.org/iriplasonline/), была оценена электронная концентрация в ночном слое E для спокойных геомагнитных условий, местоположения Алма-Аты и эпохи мая 1967 года. Расчет показал, что значение NmE составляет $\sim 3 \cdot 10^3$ эл/см³, что существенно ниже наблюдаемых значений. Ранние наблюдения [27] показали, что электронная плотность в нижней ионосфере увеличивается во время геомагнитных бурь по сравнению со спокойными условиями. Авторы [28–29] предположили, что возможной причиной этих повышений плотности является выпадение энергичных нейтральных атомов с энергиями 1–100 кэВ из зоны кольцевого тока во время магнитной бури, когда значительное количество энергии поступает в кольцевой ток из внутренней магнитосферы. Эти энергичные нейтральные частицы образуются в результате зарядообменного взаимодействия ионов кольцевого тока с нейтральным водородом геокороны. В результате взаимодействия образуются холодный протон и энергичный нейтральный атом. Магнитное поле не влияет на траекторию движения энергичных нейтралов, и последние способны покидать зону кольцевого тока. Движущиеся к Земле частицы попадают в плотную атмосферу и взаимодействуют с частицами газа в ходе упругих и неупругих столкновений. Во время каждого из этих столкновений эти частицы теряют часть своей энергии, которая тратится на ионизацию и нагрев. Сложные процессы взаимодействия энергичных нейтралов, высыпаящихся из зоны кольцевого тока, с нейтральными частицами на высотах нижней ионосферы были смоделированы Bauske et al. [33]. Авторы показали, что уровень ионизации максимален в протяженной области между 25° и 50° магнитной широты и в диапазоне высот между 115 и 135 км. Результаты этой работы (появление аномального ночного повышения электронной плотности в слое E) согласуются с нашими предыдущими наблюдениями [30–32] и соответствуют физическому механизму выпадения энергичных частиц на средних широтах, представленному моделированием [33].

Наблюдаемые на всех станциях положительные отклонения критических частот f_oF2 27-го мая на фазе восстановления магнитной бури и последующая

возмущенная структура вариаций f_oF2 28 мая могут быть обусловлены, так называемыми, перемещающимися атмосферными возмущениями ПАВ (Travelling Atmospheric Disturbances, TAD) [25]. На средних широтах ПАВ-ы могут вызывать увеличение вертикального дрейфа и, таким образом, вызывать положительный эффект в f_oF2 . Особенности вариаций f_oF2 и $h'F2$ 27–28 мая могут служить подтверждением данного механизма формирования наблюдаемых явлений в условиях летнего сезона, при которых произошла рассматриваемая ионосферная буря.

И наконец, особое внимание привлекает к себе период повышенных значений f_{min} 28 мая длительностью порядка 3-х часов, с 10:30 LT до 13:30 LT или с 05:30 UT до 08:30 UT, то есть период повышенного поглощения зондирующего сигнала в области D и E до полного поглощения и исчезновения отражений от ионосферы с 10:45 LT до 11:00 LT (05:45–06:00 UT), рисунок 4в. Анализ дополнительных данных, полученных на станциях близких широт, но разнесенных по долготе (координаты японских станций: Wakkanai [45.39N, 141.69E; 135E], Akita [39.73N, 140.13E; 135E], Kokubunji [37.71N, 139.48E; 135E], Yamagawa [31.20N, 130.61E; 135E], где третья координата – меридиан часового пояса станции), показал аналогичный эффект полного поглощения зондирующего сигнала в то же самое время, что и на ст. Алма-Ата (рисунок 5), в 14:45–15:00 LT или в 05:45–06:00 UT. То есть, данное событие наблюдалось в интервале долгот 75–135E и для рассматриваемых станций началось одновременно. Поглощения такого типа обычно наблюдаются в высоких широтах и появляются вследствие образования повышенной ионизации на низких высотах (D-области), где высокая температура и частота столкновения частиц. На рисунках 4 и 5 заметны признаки повышенной электронной концентрации и в E-области (повышенные значения f_oE) как для ст. Алма-Ата так и для ст. Wakkanai (выделено кружками). Здесь ещё раз заметим, что в день 28 мая 1967 г. наблюдался интенсивный поток солнечных космических лучей (потоков заряженных частиц высокой энергии, которые генерируются на Солнце или вблизи него во время солнечных вспышек и выбросов корональных масс), где максимальная интенсивность протонов составляла ≥ 60 MeV [17], рисунок 6 (выделенный фрагмент), что могло стать причиной наблюдаемого эффекта в ионосфере.

**ИОНОСФЕРНАЯ БУРЯ 25/26 МАЯ 1967 Г. КАК МОДЕЛЬ ОТКЛИКА ИОНОСФЕРЫ
НА ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ**

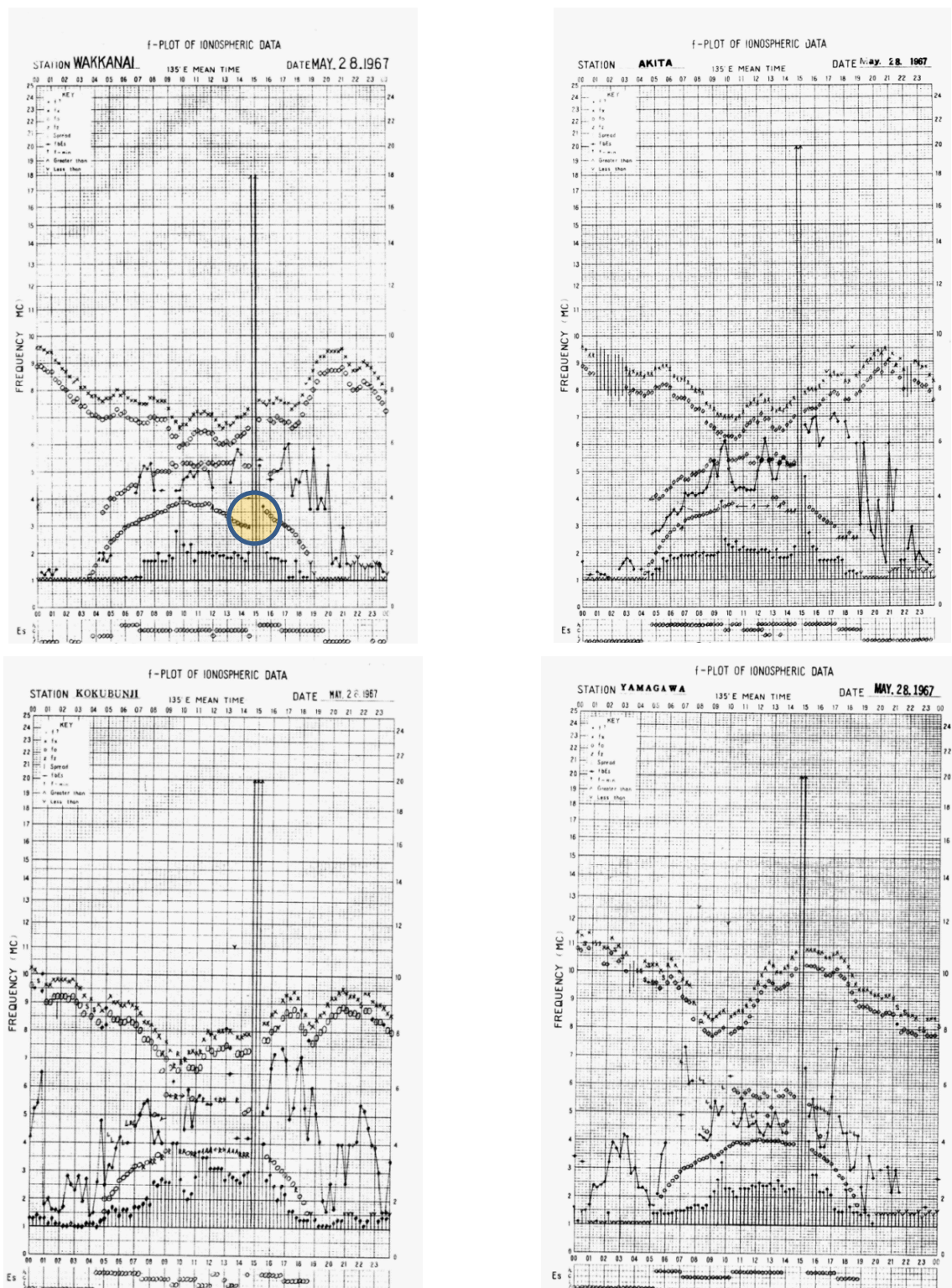


Рисунок 5. f-графики для станций Wakkanai, Akita, Kokubunji, Yamagawa за 28 мая 1967 г.

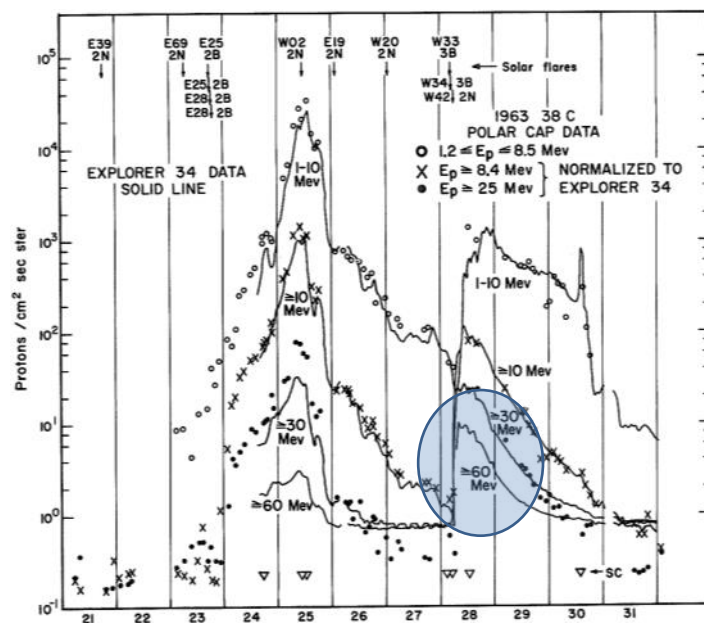


Рисунок 6. Вариации интенсивности потоков протонов разных энергий в период 21–31 мая 1967 года [17]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследования ионосферных эффектов экстремальной геомагнитной бури 25/26 мая 1967 г. ($Dst = -387$ nT), полученные с использованием ионосферных данных, измеренных на пяти ионосферных станциях, расположенных в регионе Средней Азии. Геомагнитная буря с начальной фазой продолжительностью примерно 9 часов, наблюдалась с ~13:00 UT до 22:00 UT 25-го мая, что для рассматриваемого региона соответствует ночному времени (18:00 LT – 03:00 LT).

Отрицательное ионосферное возмущение продолжительностью порядка 28 часов, начавшееся на всех рассматриваемых станциях во время начала главной фазы геомагнитной бури, характеризовалось понижением критических частот слоя F2 ионосферы $foF2$ в ~2,2 раза по сравнению с уровнем $foF2$ в спокойных геомагнитных условиях. Наблюдавшееся во время отрицательной фазы ионосферной бури «условие G», когда $foF2 \leq foF1$, продолжалось порядка 11 часов и указывало на значительные изменения в параметрах термосферы, ответственных за формирование F-области в средних широтах.

Аномальное образование ночного E-слоя, наблюдаемое на всех ионосферных станциях, обсуждается в рамках физического механизма высыпания энергичных частиц на средних и низких широтах.

Повышенные значения и *wave-like* вариации критических частот $foF2$, наблюдаемые во время фазы восстановления геомагнитной бури, интерпретируются с точки зрения обусловленности их перемещающимися атмосферными возмущениями (TAD).

Событие *black out*, связанное с полным поглощением зондирующего сигнала, наблюдаемое на станциях

в регионе Средней Азии и Дальнего Востока 28 мая, ассоциируется с воздействием на нижнюю ионосферу потока солнечных космических лучей высокой интенсивности, зарегистрированных в этот период [17].

Ионосферная буря 25/26 мая может быть служить моделью отклика ионосферы на экстремальное возмущение магнитного поля Земли.

Благодарности

Данное исследование спонсировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № BR21882375 «Создание и модернизация изделий космической техники повышенной надежности наземного и космического сегментов и исследование ионосферы»). Особенности локальных геомагнитных вариаций оценивались по данным геомагнитной обсерватории Алма-Ата. Данные по F10.7 загружены с сайта <http://www.swrsc.noaa.gov>.

Автор выражает благодарность О. Шкрамада за помощь в обработке материалов архивных ионосферных данных.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Gopalswamy, N., Yashiro, S., Michalek, G., Xie, H., Lepping, R. P., and Howard, R. A. Solar source of the largest geomagnetic storm of cycle 23 // *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – Vol. 32. – At. no. L12S09. <https://doi.org/10.1029/2004GL021639>
- Daglis, I. A., Chang, L. C., Dasso, S., Gopalswamy, N., Khabarova, O. V., Kilpua, E., Lopez, R., Marsh, D., Matthes, K., Nandy, D., Seppälä, A., Shiokawa, K., Thiéblemont, R., and Zong, Q. Predictability of variable solar–terrestrial coupling // *Ann. Geophys.* – 2021. – Vol. 39. – P. 1013–1035. <https://doi.org/10.5194/angeo-39-1013-2021>

3. Lam, H.-L., Boteler, D. H., and Trichtchenko, L. Case studies of space weather events from their launching on the Sun to their impacts on power systems on the Earth // *Annales Geophysicae*. – 2002. – Vol. 20. – P. 1073–1079.
4. Lanzerotti, L. J., 2001. Space weather effects on technologies // *Space Weather*. – 2001. – Vol. 125. – 11.
5. Basu, Su., Basu, S., Makela, J. J., MacKenzie, E., Doherty, P., Wright, J. W., Rich, F., Keskinen, M. J., Sheehan, R. E., and Coster, A. J. Large magnetic storm-induced nighttime ionospheric flows at midlatitudes and their impacts on GPS-based navigation systems // *J. Geophys. Res.* – 2008. – Vol. 113. – Art. no. A00A06. <https://doi.org/10.1029/2008JA013076>
6. Afraimovich, E.L., Demyanov, V.V., Kondakova, T.N. Degradation of performance of the navigation GPS system in geomagnetically disturbed conditions // *GPS Solutions*. – 2003. – Vol. 7(2). – P. 109–119.
7. Bolduc, L. GIC observations and studies in the Hydro-Quebec power system // *J Atmos. Sol. Terr. Phys.* – 2002. – Vol. 64. – P. 1793–1802.
8. Gaunt, C. T., and Coetzee, G. Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC-risk // In *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne, Switzerland*. – P. 807–812.
9. Dang, T., Li, X., Luo, B., Li, R., Zhang, B., Pham, K., et al. Unveiling the space weather during the Starlink satellites destruction event on 4 February 2022 // *Space Weather*. – 2022. – Vol. 20, e2022SW003152. <https://doi.org/10.1029/2022SW003152>
10. Mike Wall, 2016. How a 1967 Solar Storm Nearly Led to Nuclear War, <https://www.space.com/33687-solar-storm-cold-war-false-alarm.html>.
11. Akasofu S.I. and Perreault P.D. The geomagnetic storm of May 25-26, 1967. // *WDC-A, Upper Atmosphere Geophysics, ESSA, Boulder, Colorado*. – P. 92–101.
12. Knipp, D. J., Ramsay, A.C., Beard, E. D. et al. The May 1967 great storm and radio disruption event: Extreme space weather and extraordinary responses // *Space Weather*. – 2016. – Vol. 14. – P. 614–633. <https://doi.org/10.1002/2016SW001423>
13. Report UAG-91 “Combined Catalog of Ionosphere Vertical Soundings”, World Data Centers for Solar-Terrestrial Physics, NGDC, Boulder, Colorado, December 1984.
14. Lauter, E. A., Entzian, G. Winter anomaly 1980/81 as an example of stratomesospheric coupling // *Phys. Solariterr.* – 1982. – Vol. 18. – P. 83–90.
15. Kokourov, V. D., 2003. Minimum frequency of reflections as a climatic characteristic of the upper atmosphere // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2003. – Vol. 43(2). – P. 274–276 (In Russ.).
16. Barta, V., Satori, G., Berényi, K.A., Kis, Á. and Williams, E. Effects of solar flares on the ionosphere as shown by the dynamics of ionograms recorded in Europe and South Africa // *Ann. Geophys.* – 2019. – Vol. 37. – P. 747–761. <https://doi.org/10.5194/angeo-37-747-2019>
17. Bostrom, C. O., Kohl, J. W., Williams, D. J. and Arens, J. F., 1969. The solar cosmic ray events in May, 1967. Report UAG-5 “Data on Solar Event of May 23, 1967 and its Geophysical Effects”, WDC-A, Upper Atmosphere Geophysics, ESSA, Boulder, Colorado, 68–70.
18. Van Allen, J.A., 1969. Solar X-ray flares on 23 May 1967. Report UAG-5 “Data on Solar Event of May 23, 1967 and its Geophysical Effects”, WDC-A, Upper Atmosphere Geophysics, ESSA, Boulder, Colorado, 46–47.
19. Danilov, A.D. and Morozova, L.D. Ionospheric storms in the F2 region: Morphology and physics (Review) // *Geomagn. Aeron.* – 1985. – Vol. 25. – P. 593–605.
20. Buonsanto, M.J. Ionospheric Storms – A Review // *Space Science Reviews*. – 1999. – Vol. 88. – P. 563–601.
21. Mikhailov, A.V. Ionospheric F2-layer storms // *Fisica de la Tierra*. – 2000. – Vol. 12. – P. 223–262.
22. Echer, E., Gonzalez, W. D., and Tsurutani, B. T. Interplanetary conditions leading to superintense geomagnetic storms (Dst 250 nT) during solar cycle 23 // *Geophysical Research Letters*. – 2008. – Vol. 35. – L06S03. <https://doi.org/10.1029/2007GL031755>
23. Echer, E., Gonzalez, W.D., Tsurutani, B.T. Statistical studies of geomagnetic storms with peak Dst 50 nT from 1957 to 2008 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2011. – Vol. 73. – P. 1454–1459.
24. Paznukhov, V. V., Altadill, D., and Reinisch, B. W. Experimental evidence for the role of the neutral wind in the development of ionospheric storms in midlatitudes // *J. Geophys. Res.* – 2009. – Vol. 114. – A12319. <https://doi.org/10.1029/2009JA014479>
25. Danilov, A.D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances // *Advances in Space Research*. – 2013. – Vol. 52. – P. 343–366.
26. Perrone, L., Mikhailov, A.V., Sabbagh, D. Thermospheric Parameters during Ionospheric G-Conditions // *Remote Sens.* – 2021. – Vol. 13. – 3440. <https://doi.org/10.3390/rs13173440>.
27. Wakai, Noboru Quiet and Disturbed Structure and Variations of the Nighttime E Region // *J. Geophys. Res.* – 1967. – Vol. 72. – P. 4507–4517.
28. Lyons, L. R., and Richmond, A. D. Low-latitude E region ionization by energetic ring current particles // *J. Geophys. Res.* – 1978. – Vol. 83. – P. 2201–2204.
29. Tinsley, B. A. Energetic neutral atom precipitation during magnetic storms: Optical emission, ionization, and energy deposition at low and middle latitudes // *J. Geophys. Res.* – 1979. – Vol. 84. – P. 1855–1864.
30. Gordienko, G. I. Mid-latitude ionospheric effects of the March 13, 1989 magnetic storm // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 1997. – Vol. 37(5), – P. 180–183 (in Rus.).
31. Gordienko, G.I., Vodyannikov, V.V. and Yakovets A.F. Ionospheric disturbances over Alma-Ata during the October-November 2003 magnetic storms // *Journal of Geophysical Research*. – 2005. – Vol. 110, A09S35. – P. 1–13. <https://doi.org/10.1029/2004JA010945>
32. Gordienko, G.I., Vodyannikov, V.V., Yakovets A.F. Geomagnetic storm effects in the ionospheric E- and F-regions // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2011. – Vol. 73. – P. 1818–1830.
33. Bauske, R., Noel, S. and Proß G. W., 1997. Ionospheric storm effects in the nighttime E region caused by neutralized ring current particles // *Ann. Geophys.* – 1997. – Vol. 15. – P. 300–305.

1967 ЖЫЛДЫҢ 25/26 МАМЫРЫНДА ИОНОСФЕРАЛЫҚ ДАУЫЛ КЕЗІНДЕГІ ЖЕРДІҢ МАГНИТ ӨРІСІНІҢ ҚАТТЫ БҰЗЫЛУЫНА ИОНОСФЕРАНЫҢ ЖАУАП БЕРУ МОДЕЛІ

Г. И. Гордиенко, Ю. Г. Литвинов, М. Ю. Жиганбаев*

«Ионосфера институты» ЖШС, Алматы, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: zhiganbayev@ionos.kz*

1967 жылғы 25/26 мамырдағы экстремалды геомагниттік дауылдың ионосфералық әсерін зерттеу нәтижелері ($Dst = -387$ nT) Орта Азия аймағында орналасқан бес ионосфералық станцияда өлшенген ионосфералық деректерді қолдану арқылы алынған. Бастапқы фазасы шамамен 9 сағатқа созылатын геомагниттік дауыл ~20 UT 25 мамырда басталды, бұл аймақ үшін 26 мамырда түнгі уақытқа (00:01 LT) сәйкес келеді.

Геомагниттік дауылдың негізгі фазасы басталған кезде барлық қарастырылған станцияларда басталған шамамен 28 сағаттық теріс ионосфералық бұзылыс f_{oF2} ионосферасының F2 қабатының критикалық жиіліктерінің тыныш геомагниттік жағдайларда f_{oF2} деңгейімен салыстырғанда 2,2 есе төмендеуімен сипатталды. Ионосфералық дауылдың теріс фазасы кезінде байқалған «G шарты», f_{oF2} f_{oF1} , шамамен 11 сағатқа созылды және орта ендіктерде F-аймағының қалыптасуына жауап беретін термосфера параметрлерінде айтарлықтай өзгерістерді көрсетті.

Барлық ионосфералық станцияларда байқалатын түнгі E қабатының қалыптан тыс түзілуі орта және төменгі ендіктердегі энергетикалық бөлшектердің атқылауының физикалық механизмі аясында талқыланады.

Геомагниттік дауылдың қалпына келу кезеңінде байқалған f_{oF2} критикалық жиіліктерінің жоғарылаған мәндері мен толқын тәрізді вариациялары олардың қозғалатын атмосфералық бұзылыстарымен кондиционерлеу тұрғысынан түсіндіріледі.

28 мамырда Орталық Азия мен Қиыр Шығыс аймағындағы станцияларда байқалған зондтау сигналының толық жұтылуына байланысты *black out* оқиғасы осы кезеңде тіркелген жоғары қарқынды күн ғарыштық сәулелерінің төменгі ионосфералық ағынының әсерімен байланысты.

25/26 мамырдағы ионосфералық дауыл болуы мүмкін ионосфераның Жердің магнит өрісінің қатты бұзылуына жауап беру моделі ретінде қызмет етеді.

Түйін сөздер: *ионосфера, ионосфералық дауыл, экстремалды геомагниттік дауыл.*

IONOSPHERIC STORM OF MAY 25/26, 1967 AS A MODEL OF IONOSPHERIC RESPONSE TO EXTREME DISTURBANCE OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD

G. I. Gordienko, Yu. G. Litvinov, M. Yu. Zhiganbayev*

“Institute of Ionosphere” LLP, Almaty, Kazakhstan

** E-mail for contacts: zhiganbayev@ionos.kz*

The article presents the results of the study of ionospheric effects of the extreme geomagnetic storm of May 25/26, 1967 ($Dst = -387$ nT) obtained using ionospheric data measured at five ionospheric stations located in the Central Asian region. The geomagnetic storm with an initial phase lasting approximately 9 hours began at ~20 UT on May 25, which for the region under consideration corresponds to nighttime (at 00:01 LT) on May 26.

The negative ionospheric disturbance lasting about 28 hours, which began at all stations under consideration during the onset of the main phase of the geomagnetic storm, was characterized by a decrease in the critical frequencies of the ionospheric F2 layer f_{oF2} by 2.2 times compared to the f_{oF2} level under quiet geomagnetic conditions. The “G condition” observed during the negative phase of the ionospheric storm, when f_{oF2} f_{oF1} , lasted for about 11 hours and indicated significant changes in the thermospheric parameters responsible for the formation of the F-region in the middle latitudes. The anomalous formation of the nighttime E-layer observed at all ionospheric stations is discussed in the context of the physical mechanism of energetic particle precipitation at middle and low latitudes.

The increased values and wave-like variations of the critical frequencies of f_{oF2} observed during the recovery phase of the geomagnetic storm are interpreted in terms of their being caused by traveling atmospheric disturbances (TAD).

The *black out* event associated with the complete absorption of the sounding signal observed at stations in the Central Asian and Far Eastern regions on May 28 is associated with the impact of the high-intensity solar cosmic ray flux recorded during this period on the lower ionosphere.

The ionospheric storm of May 25/26 can serve as a model of the ionospheric response to an extreme disturbance of the Earth's magnetic field.

Keywords: *ionosphere, ionospheric storm, extreme geomagnetic storm.*