Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 281–284.

УДК 550.388, 550.385
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-281

НАБЛЮДЕНИЕ УСЛОВИЙ А И В ВО ВРЕМЯ ИНТЕНСИВНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ ПО ДАННЫМ ЯКУТСКОЙ ЦЕПОЧКИ ИОНОСФЕРНЫХ СТАНЦИЙ

И.А. Константинова[1], А.Е. Степанов[1], А.Ю. Гололобов[1, 2]

[1]Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия,
KonstantinovaIA@ikfia.ysn.ru
[2]Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

OBSERVATION OF A AND B CONDITIONS DURING INTENSE GEOMAGNETIC STORMS, ACCORDING TO THE YAKUT CHAIN OF IONOSPHERIC STATIONS

I.A. Konstantinova[1], A.E. Stepanov[1], A.Yu. Gololobov[1, 2]

[1]The Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia,
KonstantinovaIA@ikfia.ysn.ru
[2]The M.K. Ammosov North-Eastern Federal University

Аннотация. В работе была проведена регистрация каждого случая, когда на измерение среднечасового значения критической частоты f_0F2 ионизированного слоя F2 повлияло условие A или B с 1968 по 1994 гг. для ст. Тикси и с 1958 по 2002 гг. для ст. Якутск. Чтобы проследить, как проявляются эти условия во время геомагнитных возмущений, были отобраны 16 событий мощных по интенсивности магнитных бурь с 1976 по 1994 гг. (21-й и 22-й циклы солнечной активности). Практически во всех случаях, регистрация экранирования радиосигналов спорадическим слоем или поглощение на ст. Тикси происходит раньше на $\Delta t = 1$ час, чем на ст. Якутск, причем периоды блэкаутов радиосигналов в Тикси отличаются большей продолжительностью.

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, авроральная и субавроральная ионосфера, геомагнитная буря, ионосферные наблюдения, описательные буквы, цепь ионозондов.

Abstract. In the paper, we recorded each case when the measurement of the hourly average value of the critical frequency f_0F2 of the ionized layer F2 was affected by A or B condition from 1968 to 1994 for Tiksi station and from 1958 to 2002 for Yakutsk station. To track how these conditions manifest themselves during geomagnetic disturbances, 16 events of powerful magnetic storms from 1976 to 1994 (the 21st and 22nd cycles of solar activity) were selected. In almost all cases, the recording of signal shielding by a sporadic layer or absorption at the Tiksi station occurs $\Delta t = 1$ hour earlier than at Yakutsk station, and the periods of radio signal blackouts in Tiksi are longer.

Keywords: high-latitude ionosphere, auroral and subauroral ionosphere, geomagnetic storm, ionospheric observations, descriptive letters, ionosonde chain.

ВВЕДЕНИЕ

Вертикальное зондирование (ВЗ) – один из классических методов наблюдения состояния ионосферы. Однако, метод может сталкиваться с обстоятельствами, затрудняющими ход исследования. Поэтому Международным союзом исследований радиоволн (Union Radio-Scientifique Nationale, URSI) была принята система буквенных обозначений, которая служит для того, чтобы объяснить отсутствие измерения или указать причину его недостоверности [Алпатов и др., 2012]. К таким случаям относятся описательные буквы A, B и C.

Если описательная буква C свидетельствует о невозможности измерения по причине любого технического нарушения в работе станции, то применение букв A и B связано с ионосферными причинами.

Условие A используют, когда на определение характеристики влияет присутствие спорадического слоя Es. Это узкие, плотные образования повышенной ионизации, которые формируются на высотах 90-130 км. Они затрудняют процесс измерения тем, что блокируют вышележащие слои ионосферы, вследствие чего при распространении радиоволн сигналы отражаются только от них [Губенко В.Н., Кириллович И.А., 2020]. Хотя образование спорадических слоев связывают с разными факторами и в первую очередь с ветровыми сдвигами, в высоких широтах они могут возникать под воздействием геомагнитных возмущений [Davies K., 1965].

Условие B иначе называют “blackout”, и оно характеризуется полным поглощением сигналов при ВЗ. Следовательно, если в первом случае наблюдается лишь количественная информация о спорадическом слое, то при поглощении в месте приема отсутствуют как F2-, так и Es- отражения [Благовещенский Д.В., Сергеева М.А., 2015; Харгривс Дж.К., 1982]. Существует ряд работ, в которых разрывы связи сигналов ионозондов являются серьезным препятствием для исследования слоев ионосферы, в частности вариаций критической частоты f_0F2 [Черниговская М.А. и др., 2024; Chernigovskaya M.A. et al., 2025]. Известно, что авроральное поглощение (Auroral Absorption, AA) локализуется в нижней ионосфере на уровне D и нижней части области E, оно образуется в результате вторжения потоков энергичных протонов и электронов из магнитосферы [Hargreaves J.K., 1969].

С увеличением геомагнитной активности наблюдается смещение поглощающей области к экваториальным широтам. [Трошичев О.А., 1986] Таким образом, интенсивные геомагнитные бури в

высоких широтах вызывают сложные процессы в ионосфере.

Ионосферные наблюдения методом ВЗ в Якутске начались с конца 50-х годов XX-го века. На данный момент архив обработанных среднечасовых значений ИКФИА СО РАН содержит данные с 1958 по 2002 гг. для ст. Якутск, с 1976 по 1994 для ст. Тикси и с 1976 по 1980 гг. для ст. Жиганск. Для Тикси и Якутска была выполнена задача отметить начало и продолжительность каждого случая, когда определение критической частоты f_0F2 ионизированного слоя F2 было нарушено условием экранирования или поглощения. Хотя по количеству данных Якутск охватывает больший временной период, в текущей работе делается упор на анализ сравнительной характеристики регистрации условий А и В между ст. Тикси и Якутск. Следовательно, в исследовании рассматривается промежуток с 1976 по 1994 гг., что соответствует 21-му и 22-му циклу солнечной активности (март 1976 – сентябрь 1986 и сентябрь 1986 – август 1996 соответственно). Ионосферные станции, которые функционировали на тот момент, представляли из себя станции вертикального зондирования типа АИС с антенными системами «вертикальный ромб» [Степанов А.Е. и др., 2017].

Целью данной работы является рассмотреть сопровождающие повышение геомагнитной активности затруднения в определении ионосферных характеристик как самостоятельное явление в условиях географических особенностей Якутской меридиональной цепочки ионозондов – Тикси (71,7°N, 128,9°E), Жиганск (66,76°N, 123,35°E), Якутск (62°N, 129,8°E).

АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа был произведен поиск случаев интенсивных геомагнитных бурь на основании информации с сайта SpaceWeatherLive [https://www.spaceweatherlive.com/en/auroral-activity/top-50-geomagnetic-storms.html]. В зависимости от наличия данных, были выбраны следующие даты (табл. 1):

Таблица 1. Список интенсивных геомагнитных бурь с 1976 по 1994 гг.

№	Дата	Dst, нТл	Ap	Kp
1	1989/03/14	-589	158	9
2	1991/11/09	-354	119	8+
3	1982/07/14	-325	153	9
4	1981/04/13	-311	121	8+
5	1986/02/09	-307	100	9
6	1991/03/25	-298	130	9-
7	1992/05/10	-288	179	9-
8	1990/04/10	-281	161	9-
9	1989/10/21	-268	146	8+
10	1991/10/29	-254	128	8+
11	1976/03/26	-226	145	8
12	1981/07/25	-226	134	8+
13	1991/06/05	-223	196	9-
14	1979/04/04	-202	47	7-
15	1994/04/17	-201	100	8+
16	1992/02/09	-201	79	7

Представленные магнитные бури являются одними из самых мощных по интенсивности в 21-ом и 22-ом цикле солнечной активности, по классификации NASA их класс варьируется от G3 (Strong) до G5 (Extreme) [https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation].

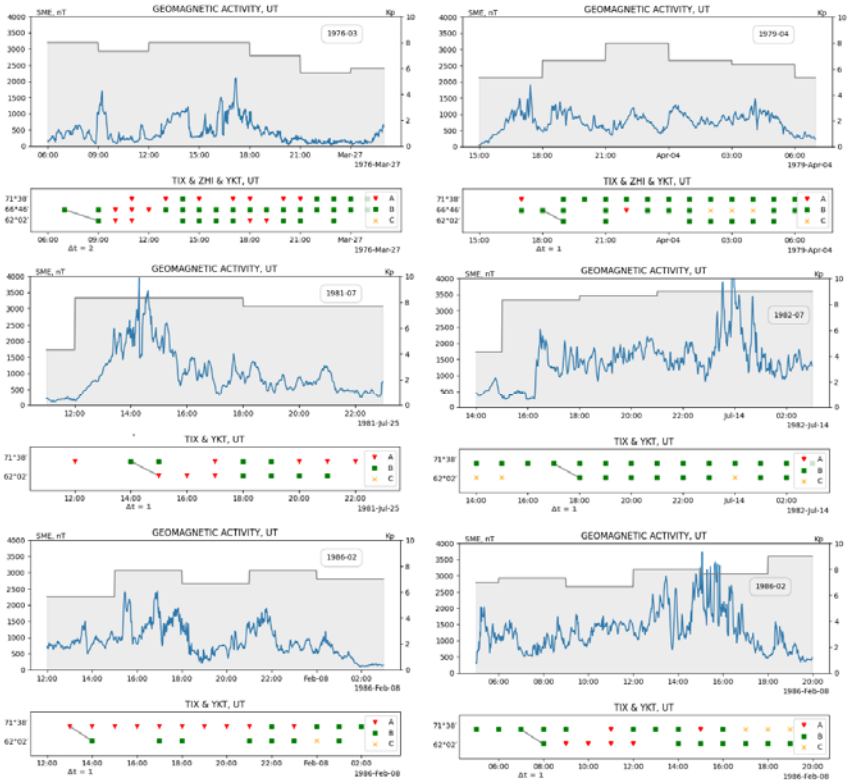

Рис. 1. Графики регистрации условий А, В и С и вариаций индексов геомагнитной активности за отдельные дни 21-го цикла солнечной активности (март 1976 – сентябрь 1986).

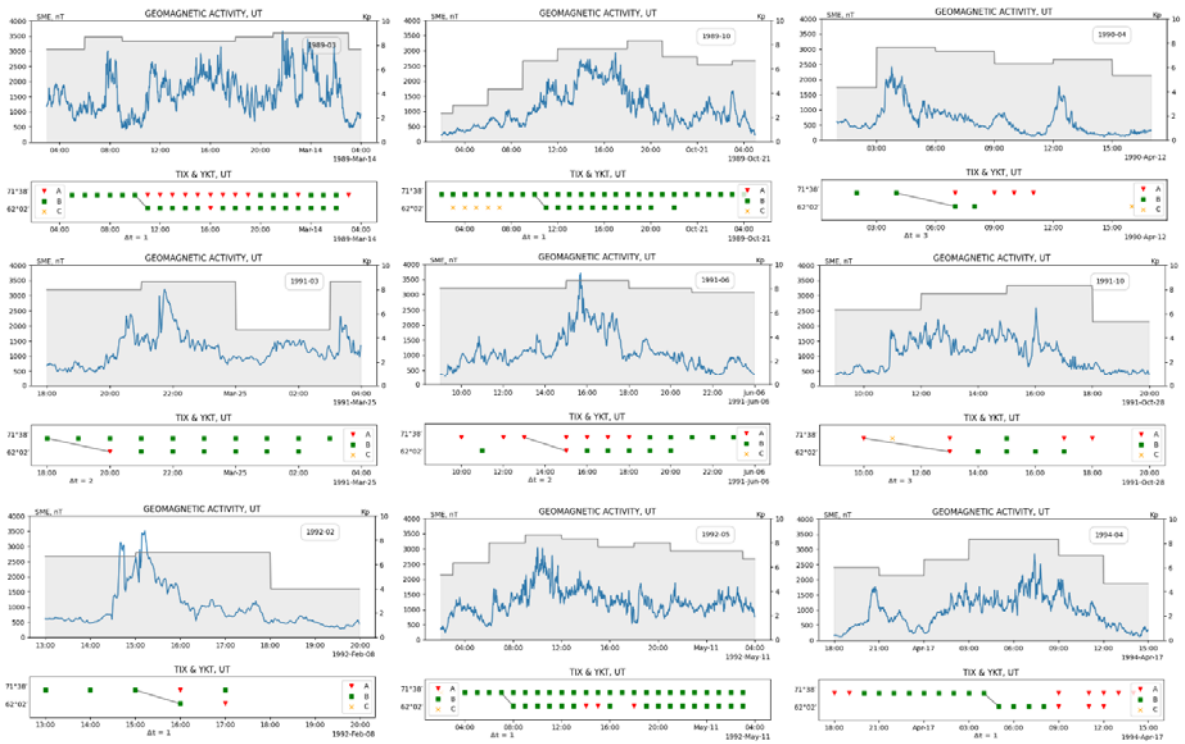

Рис. 2. Графики регистрации условий A, B и C и вариаций индексов геомагнитной активности за отдельные дни 22-го цикла солнечной активности (сентябрь 1986 – август 1996)

Было решено не использовать вариации индекса Dst (Disturbance Storm Time) для оценки геомагнитной активности по той причине, что они вычисляются как усредненные значения между станциями Hermanos (-34.40°N, 19.22 °E), Kakioka (36.23°N, 140.18°E), Honolulu (21.30°N, 201.90°E) и San Juan (18.38°N, 293.88°E), поэтому не справляются с точным описанием условий в высоких широтах. Обычно в полярных широтах используется индекс AE (Auroral Electrojet), который характеризует интенсивность аврорального тока и является индикатором суббуревой активности. Однако, в данной работе предпочтение было отдано индексу SME (SuperMAG Auroral Electrojet), так как он вычисляется на основе данных более 100 наземных станций и дает более точные результаты. Вариации SME были сопоставлены со значениями индекса K_p в мировом времени.

Получены 6 графиков за 21-й цикл солнечной активности, описывающих бури 26 марта 1976, 4 апреля 1979, 25 июля 1981, 14 июля 1982, 7 и 8 февраля 1986 (рис. 1) и 9 графиков за 22-й цикл, описывающих бури 14 марта 1989, 21 октября 1989, 12 апреля 1990, 25 марта 1991, 5 июня 1991, 28 октября 1991, 8 февраля 1992, 10 мая 1992, 17 апреля 1994 (рис. 2). Результаты, соответствующие бурям 9 ноября 1991 и 13 апреля 1981, были сочтены неудовлетворительными из-за наблюдения в указанные периоды продолжительного условия C на ст. Тикси.

На каждом из графиков в верхней половине синей линией обозначены вариации индекса SME, а серыми областями выделены значения индекса Kp. В нижней половине изображены ионосферные характеристики Тикси (71°38′), Жиганска (66°46′) и Якутска (62°02′), (▼) соответствует условию A, (■) – условию B, (×) – условию C. Серой линией изображено время перемещения Δt неоднородных структур между станциями.

В подавляющем числе случаев регистрация условий A и B в первую очередь совершалась на ст. Тикси, и при особо интенсивных возмущениях индекса SME (SME <1000 нТл) могла непрерывно наблюдаться на протяжении всего события. Тем временем регистрации срывов критической частоты f_0F2 на ст. Якутск примерно совпадали с пиками активности при значительном повышении индекса K_p >6. Время перемещения Δt неоднородных структур между станциями варьируется от 1 до 3 часов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Смещение ионосферных структур (напр. полярной стенки главного ионосферного провала) во время больших активизаций составляет 1 час – т.е. перемещение ионосферных неоднородных структур от полярной станции Тикси до субавроральной станции Якутск (около 10 градусов или ~ 1000 км) происходит в течение 1 часа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-17-20002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алпатов В.В., Буров В.А., Гивишвили Г.В., Данилов А.Д. и др. Руководство по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям. Ч. I Ионосферные наблюдения. Выпуск 1 (Проект). Москва ФГБУ «ИПГ», 2012. 270 с.

Благовещенский Д.В., Сергеева М.А. Воздействие магнитных бурь на нижнюю ионосферу в авроральной зоне // Солнечно-земная физика, 2015. Т. 1, № 3. С. 3-10.

Губенко В.Н., Кириллович И.А. Связь наклонных спорадических Е-слоев и мелкомасштабных атмосферных волн в ионосфере Земли // Космические исследования, 2020, том 58, № 3. С. 179-190.

Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А., Бондарь Е.Д. Поляризационный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы. Якутск : издательский дом СВФУ, 2017. 176 с.

Трошичев О.А. Ионосферно-магнитные возмущения в высоких широтах. Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ), 1986. 256 с.

Харгривс Дж.К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. Введение в физику околоземной космической среды. Перевод на русский язык, Ленинград Гидрометеоиздат, 1982. 351 с.

Черниговская М.А., Сетов А.Г., Ратовский К.Г., Калишин А.С., Степанов А.Е. Изменчивость ионизации ионосферы над Евразией по данным цепи высокоширотных ионозондов во время экстремальных магнитных бурь 2015 г. // Солнечно-земная физика, 2024, Т. 10, № 2. С. 38-52.

Chernigovskaya M.A., Zherebtsov G.A., Ratovsky K.G., Setov A.G. et al. Ionospheric response to superstorm in May 2024 over mid- and high-latitude Eurasia // Advances in Space Research 76, 2025. P. 7351-7374.

Davies K. Ionospheric Radio Propagation. National Bureau of Standards Monograph 80, 1965. P. 470.

Hargreaves J.K. Auroral Absorption of HF Radio Waves in the Ionosphere: A Review of Result from the First Decade of Riometry // Proceedings of the IEEE, Vol. 57, No. 8, 1969. P. 1348-1373.

URL: https://www.spaceweatherlive.com/en/auroral-activity/top-50-geomagnetic-storms.html (дата обращения: 12.01.26)

URL: https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation (дата обращения: 12.05.26)