

ИЗОЛИРОВАННЫЕ СУББУРИ ПО ДАННЫМ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ТИКСИ В ПЕРИОД МИНИМАЛЬНОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

ISOLATED SUBSTORMS ACCORDING TO MAGNETIC MEASUREMENTS AT TIXIE DURING MINIMUM SOLAR ACTIVITY

Д.Г. Баншев

*Институт космических исследований и аэронавтики
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, baishev@ikfia.ysn.ru*

Г.А. Макаров

*Институт космических исследований и аэронавтики
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, gmakarov@ikfia.ysn.ru*

D.G. Baishev

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, baishev@ikfia.ysn.ru*

G.A. Makarov

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, gmakarov@ikfia.ysn.ru*

Аннотация. Составлен каталог изолированных суббурь в 2016–2020 гг. на основе данных ст. Тикси о H -компоненте геомагнитного поля. По данным каталога получено, что в этот период изменения числа суббурь и числа солнечных пятен хорошо аппроксимируются квадратичными функциями с минимумами в конце 2017 г. и в середине 2019 г. соответственно; в течение года возмущения чаще наблюдались в периоды солнцестояний; в течение суток суббури чаще возникали в полуночные часы по местному времени. Интенсивность и продолжительности суббуревых возмущений и их фазы развития не проявляют заметной зависимости от времени появления, однако по средним в часовых диапазонах значениям этих параметров обнаружено, что интенсивность минимальна около 0–3 MLT и что в полуночном секторе продолжительности возмущений и их фазы развития короче, чем в утреннем секторе. В сравнении с данными, полученными по среднеширотным станциям [Chu et al., 2015], средние продолжительности суббурь и их фазы развития больше.

Ключевые слова: суббурия, геомагнитные вариации, феррозондовый магнитометр.

Abstract. A catalog of isolated substorms in 2016–2020 has been compiled from data on the H component of the geomagnetic field, obtained at Tixie. From the catalog data, it has been found that during this period changes in the number of substorms and the number of sunspots are well approximated by quadratic functions with minima at the end of 2017 and in the middle of 2019 respectively; during the year, disturbances more often occurred during solstices; within 24 hours, substorms more often occurred at local midnight. The intensity and duration of substorm disturbances, the duration of their expansion phase do not show a noticeable dependence on the time of occurrence; however, from average values of these parameters in hourly ranges, it has been found that the intensity takes lower values around 0–3 MLT; in the midnight sector, the duration of disturbances and the duration of their expansion phase are shorter than those in the dawn sector. Compared to the data from mid-latitude stations [Chu et al., 2015], the average duration of substorms and the duration of their expansion phase are longer.

Keywords: substorm, geomagnetic variations, fluxgate magnetometer.

ВВЕДЕНИЕ

Суббури являются одним из ярких проявлений магнитосферной возмущенности [Akasofu, 1964]. Их возникновение и развитие неразрывно связаны с овалом полярных сияний [Фельдштейн, 1963; Хорошева, 1962], который является проекцией в ионосферу плазменного и пограничного слоев магнитосферы [Сергеев, Цыганенко, 1980]. Согласно [Akasofu, 1964], взрывная фаза суббури начинается с уярчения экваториальной дискретной дуги и обычно длится ~30 мин, в течение которых полярные сияния усиливаются и расширяются как в полярном, так и в азимутальном направлении. Фаза восстановления продолжительностью час или более связана со снижением авроральной активности. Подготовительная фаза суббури [McPheterson, 1970] начинается, когда замороженное в плазму солнечного ветра межпланетное

магнитное поле (ММП) с южной компонентой достигает магнитосферы и происходит пересоединение на дневной магнитопаузе. Статистические исследования показали, что, действительно, суббури происходят преимущественно в условиях южного ММП (например, [Kamide et al., 1977]).

Различают изолированные и повторяющиеся суббури [Sandhu et al., 2019], однако единого взгляда на такое различие у исследователей нет [Liou et al., 2013]. Краткое определение изолированных суббурь дано в работе [Liou et al., 2013]: изолированные суббури — это суббури с интервалом между двумя последовательными началами не менее 3 ч. Изучение изолированных суббурь позволило выделить подготовительную фазу суббури, в течение которой в магнитосфере накапливается значительная энергия, поступающая из солнечного ветра [Сергеев, Цыганенко,

1980]. В работе [Sergeev et al., 2012] отмечено, что наблюдения с помощью улучшенных космических и наземных сетей, а также всесторонние статистические исследования позволили значительно продвинуться в понимании динамики хвоста магнитосферы в начале суббури, так что процесс возникновения суббури является областью активных исследований. Подчеркивается, что наблюдения за началом фазы развития суббури предоставляют ключевую информацию для понимания суббурь и открывают новые направления для дальнейшего продвижения. О другой характеристике суббурь — частоте возникновения — в работе [Newell et al., 2013] говорится как об альтернативном и, возможно, более чистом подходе к исследованию вопроса о том, чем геомагнитные вариации обусловлены на различных временных масштабах.

По составленным ранее каталогам суббурь разными научными группами были проведены всесторонние статистические исследования суббурь. В работе [Borovsky et al., 1993] изучены вероятности возникновения случайных и периодических магнитосферных суббурь с использованием наблюдений инъекции частиц на трех геостационарных спутниках. Сезонные и циклические изменения активности суббурь по данным магнитных измерений сети IMAGE рассмотрены в [Tanskanen, 2009]. В [Newell et al., 2013] по данным о суббурях из базы мировой сети SuperMAG исследуются солнечно-циклические, сезонные и суточные вариации начала суббури. В работах [Chu et al., 2015; McPhetron, Chu, 2018] на большом статистическом материале с использованием разработанного авторами индекса положительных магнитных бухт на средних широтах (индекс *MPB*) проведен анализ закономерностей появления магнитосферных суббурь в цикле солнечной активности, по сезонам года, в течение суток, в зависимости от состояния солнечного ветра, а также исследованы основные характеристики трех фаз суббурь. В работах [Воробьев и др., 2016, 2018] на основе «Каталога изолированных суббурь» Полярного геофизического института РАН изучено влияние параметров плазмы солнечного ветра на характеристики изолированных суббурь.

Целью настоящей работы является составление на основе данных магнитных измерений на авроральной станции Тикси в период слабой солнечной активности каталога изолированных суббурь, определение частоты их появления и рассмотрение некоторых закономерностей изменений интенсивности и продолжительности суббурь.

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Магнитная станция Института космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, расположенная в бухте Тикси (исправленные геомагнитные широта 66° и долгота 197°), входит в состав Якутской меридиональной цепочки геофизических станций. Она является одним из высокоширотных пунктов наблюдения в международной сети MAGDAS [Баишев и др., 2013], а также включена в состав международной сети SuperMAG [Gjerloev et al.,

2012]. Регистрация вариаций горизонтальных H -, D - и вертикальной Z -компонент геомагнитного поля осуществляется феррозондовым магнитометром MAGDAS-9 с односекундным временным разрешением в диапазоне $\pm 70\,000$ нТл с точностью 0.1 нТл.

По данным ст. Тикси о H -компоненте геомагнитного поля в 2016–2020 гг. составлен «Каталог изолированных суббурь». В него включено 91 событие.

При отборе данных учитывались следующие условия: развитие возмущения H -компоненты геомагнитного поля в секторе 12–22 UT, или 20–06 ч по местному магнитному времени (MLT) ст. Тикси; продолжительность возмущения не более 180 мин; отклонение H -компоненты не менее 80 нТл [Tanskanen, 2009]; наличие в рассматриваемом отрезке времени возмущений аврорального индекса AL ; отсутствие в данных о Dst -индексе перед отобранными событиями заметных возмущений; отсутствие возмущений H -компоненты до выбранного события не менее трех часов. Отбор суббурь по этим критериям осуществлялся визуально.

За начало суббурь принималось время понижения H -компоненты геомагнитного поля в период соответствующих возмущений AL -индекса. Предварительная фаза суббури не учитывалась ввиду сложности определения ее начала по H -компоненте, поэтому в рассматриваемую длительность всей суббури входят фазы развития и восстановления. Конец всей суббури определялся как время окончания восстановительной фазы — время исчезновения отрицательной магнитной бухты и возвращения значений H -компоненты к спокойному уровню. За начало фазы развития суббурь бралось время резкого понижения H -компоненты на 25–30 нТл в течение 3–5 мин, а за ее конец — момент достижения минимального значения H .

Годовые числа солнечных пятен взяты из базы Мирового центра данных по солнечно-земной физике Геофизического центра РАН, Москва [<http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/sunspot/>], одноминутные значения геомагнитных авроральных индексов AU , AL — из базы Центра данных по космической физике НАСА [<https://pdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/>], данные о низкоширотном Dst -индексе и предварительные сведения об авроральных индексах за 2019 и 2020 гг. — с сайта Мирового центра данных в Киото, Япония [<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>].

2. МЕЖГОДОВЫЕ, СУТОЧНЫЕ И СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЧИСЛА СУББУРЬ

На рис. 1 приведено изменение числа n изолированных суббурь в Тикси по годам в сравнении с числом R_a солнечных пятен. Видно, что в этот период изменения числа изолированных суббурь n не проявляют какой-либо заметной закономерности, тем не менее их можно аппроксимировать полиномиальной функцией второй степени с минимумом в конце 2017 г., коэффициент корреляции $r=0.66$. На этом коротком отрезке изменения числа солнечных пятен R_a демонстрируют явную закономерность и аппрок-

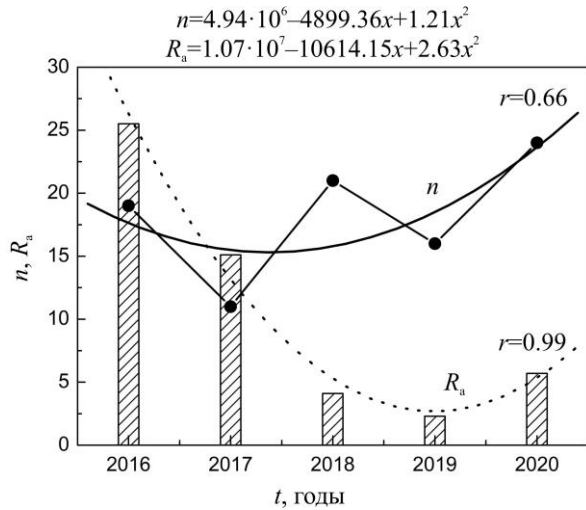


Рис. 1. Изменения числа n изолированных суббурь на ст. Тикси (черные точки, соединенные отрезками) и числа R_a солнечных пятен (гистограмма) в 2016–2020 гг.: r — коэффициенты корреляции между экспериментальными данными и полиномиальными функциями аппроксимации; сплошная и пунктирная линии — кривые функций аппроксимации для n и R_a соответственно

симируются также квадратичной функцией с минимумом в середине 2019 г. и $r=0.99$. На таком материале невозможно говорить о циклической вариации n , но заметим, что наименьшее число суббурь отмечается примерно за 1.5 года до наступления минимума солнечной активности. В работе [Newell et al., 2013] было получено, что частота суббурь достигает максимума на фазе спада солнечного цикла, тогда как в работе [Tanskanen, 2009] обнаружена слабая корреляция числа суббурь с числом солнечных пятен. Если же исходить из данных о среднеширотных положительных магнитных бурях, то суббури чаще всего возникают на нисходящей ветви солнечного цикла [McPherron, Chu, 2018].

На рис. 2 приведены распределения числа n изолированных суббурь на ст. Тикси в течение суток (поздний вечерний, полуночный и утренний сектора по MLT Тикси) (а) и в течение года (б).

В пределах выбранного сектора $20 \div 06$ MLT изолированные суббури чаще возникают в полуночные часы ($22 \div 01$ MLT), и далее в утреннем секторе частота их появления постепенно уменьшается. Это время появления суббурь хорошо известно [Akasofu, 1964] и совпадает с результатами статистических определений такого параметра по спутниковым измерениям [Liou et al., 2001; Frey et al., 2004]. По среднеширотным данным McPherron, Chu [2018] показали, что суббуревая активность имеет два характерных интервала между началами активизаций — 45 и 170 мин, и по мере увеличения возмущенности более длительный период становится доминирующим. Более короткий временной интервал, по мнению авторов, соответствует промежутку между активациями полярных сияний.

Как следует из гистограммы на рис. 2, б, в течение года изолированные суббури наиболее часто возникают в периоды солнцестояний, причем в зимний сезон число суббурь заметно выше, чем в летний сезон. Подобный результат отмечен в работе [Tanskanen,

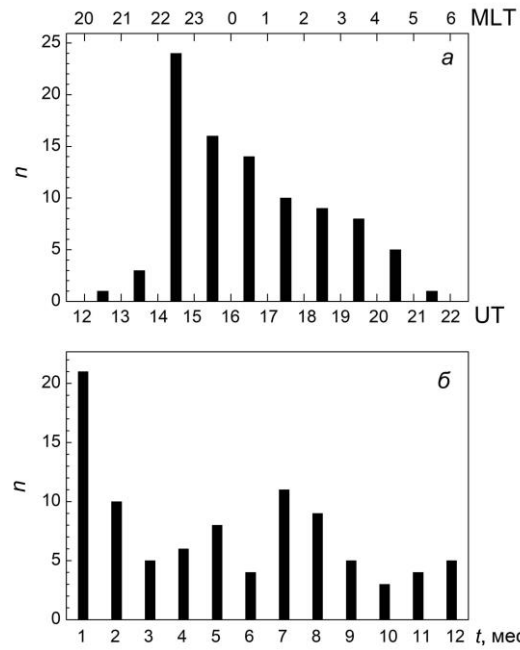


Рис. 2. Изменения числа n изолированных суббурь в Тикси: а — в течение суток (поздний вечерний, полуночный и утренний сектора по MLT Тикси); б — в течение года

2009]. Тем не менее следует оговориться, что наши результаты являются отражением выбранного фактического материала и их надо рассматривать как предварительные ввиду малой статистики. Могут присутствовать также эффекты методического характера — изолированные суббури отбирались в достаточно спокойные периоды. В работе [Newell et al., 2013] было получено, что пик суббурь приходится на равноденствия — на октябрь и март. Согласно работам [Chu et al., 2015; McPherron, Chu, 2018], в которых рассматривается среднеширотный индекс MPV , частота возникновения суббурь также характеризуется максимумами в дни равноденствий и минимумами в дни солнцестояний.

3. ИЗМЕНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СУББУРЬ

На рис. 3 слева показаны временные распределения (поздний вечерний, полуночный и утренний сектора по MLT ст. Тикси) величины понижения горизонтальной составляющей магнитного поля dH (а), характеризующей интенсивность суббури, продолжительности суббури dT (б) и продолжительности фазы развития суббури dt (в), а справа — временные изменения средних в часовых диапазонах значений этих параметров $\langle dH \rangle$ (б), $\langle dT \rangle$ (з) и $\langle dt \rangle$ (е). Из распределений dH , dT и dt видно, что понижение H (интенсивность суббури) и продолжительности суббури и фазы развития суббури не проявляют заметной зависимости от времени появления суббурь, об этом же свидетельствуют и малые величины коэффициентов корреляций r между экспериментальными данными и их линейными аппроксимациями, приведенные в левом верхнем углу каждой панели. Значения dH , dT и dt в целом соответст-

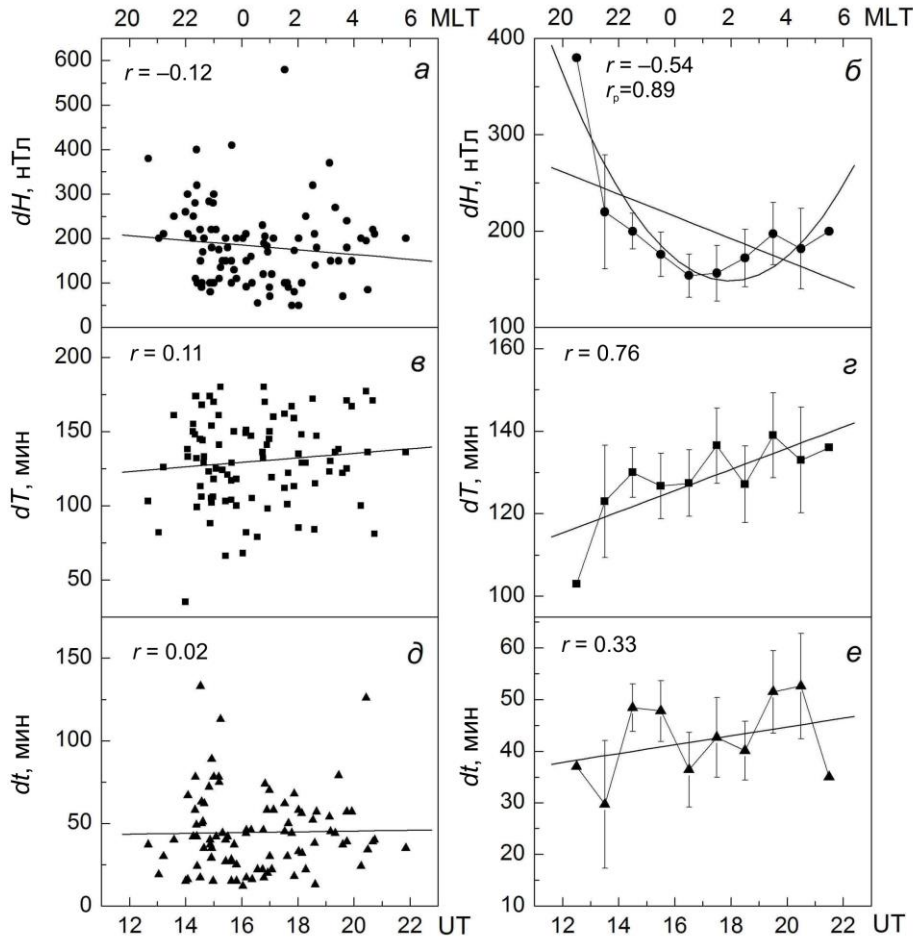


Рис. 3. Временные распределения (поздний вечерний, полуночный и утренний сектора по MLT ст. Тикси) величины понижения горизонтальной составляющей магнитного поля в Тикси dH (а), продолжительности суббури dT (б) и продолжительности фазы развития суббури dt (г), а также временные изменения средних в часовых диапазонах значений этих параметров $\langle dH \rangle$ (б), $\langle dT \rangle$ (з) и $\langle dt \rangle$ (е); вертикальные отрезки — среднеквадратичные отклонения средних; r и r_p — коэффициенты корреляции между экспериментальными данными и их линейными и квадратичными аппроксимациями (прямые линии и парабола) соответственно; на верхней оси абсцисс — местное магнитное время для Тикси

вуют значениям аналогичных параметров для индекса IL , определенного по магнитным измерениям сети IMAGE в области полярных сияний [Tanskanen, 2009].

Однако по данным о средних в часовых диапазонах значениях параметров суббурь можно заметить, что в полуночном секторе, по сравнению с утренним сектором, понижение H -компоненты магнитного поля сильнее, а продолжительности суббури и фазы развития суббури меньше. Уменьшение средней величины понижения $\langle dH \rangle$ от поздневечерних и полуночных часов к утренним при линейной аппроксимации не очень убедительно, хотя $r = -0.54$, тем более что крайние точки в этом распределении представляют единичные случаи. При квадратичной аппроксимации этих данных $\langle dH \rangle$ вершина параболы располагается на временной оси около 00–03 MLT (по экспериментальным данным около 23–02 MLT) и $r_p = 0.89$. Средняя продолжительность суббурь $\langle dT \rangle$ (з), возникающих в утренние часы, больше (до 25 мин), чем у суббурь, появляющихся в поздние вечерние и полуночные часы. Такая же закономерность, хоть и в меньшей степени, просматривается в средней продолжительности фазы развития

суббурь $\langle dt \rangle$ (е), но у этой характеристики суббурь разброс данных в рассматриваемое время довольно большой. Полученные по всему массиву событий средние значения (128 мин и 42 мин) почти в два раза превышают средние продолжительности всей суббури и фазы развития, определенные по среднеширотному индексу MPV (50 мин и 21 мин соответственно) [Chu et al., 2015].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным магнитных измерений на авроральной станции Тикси впервые составлен каталог изолированных суббурь для периода 2016–2020 гг. Это является основным результатом работы.

По включенным в каталог событиям рассмотрены их статистические распределения и некоторые закономерности. Получено, что изменения числа изолированных суббурь в Тикси и числа солнечных пятен хорошо аппроксимируются квадратичными функциями с минимумами в конце 2017 г. и в середине 2019 г. соответственно, т. е. наименьшее число суббуревых возмущений отмечается примерно за 1.5 года до минимума солнечной активности;

в течение года число суббурь максимально в периоды солнцестояний; в течение суток суббури чаще возникали в полуденные часы по местному времени, а в утреннем секторе их количество постепенно уменьшалось. Интенсивность изолированных суббурь, их продолжительность, а также продолжительность их фазы развития не проявляют заметной зависимости от времени появления рассматриваемых возмущений. Однако по данным о средних в часовых диапазонах значениях параметров суббурь обнаружено, что их продолжительность и продолжительность их фазы развития меньше в полуденном секторе по сравнению с утренним сектором, а интенсивность меньшие значения принимает около 0–3 MLT. Средние продолжительность суббурь и продолжительность их фазы развития в сравнении с результатами, полученными для среднеширотных станций [Chu et al., 2015], больше.

Авторы благодарны за возможность использования данных о геомагнитных индексах сотрудникам Мирового центра данных в Киото, Япония, и Центра космических полетов им. Годдарда НАСА (NASA's Goddard Space Flight Center), и солнечных данных — сотрудникам Мирового центра данных по солнечно-земной физике Геофизического центра РАН, Москва.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер госрегистрации 122011700182-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баишев Д.Г., Моисеев А.В., Бороев Р.Н. и др. Международный проект MAGDAS: первые результаты геомагнитных наблюдений на территории Якутии. *Наука и образование*. 2013. № 1 (63). С. 7–10.

Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Зверев В.Л. Исследование изолированных суббурь: условия генерации и характеристики различных фаз. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2016. Т. 56, № 6. С. 721–732. DOI: [10.7868/S001679401606016X](https://doi.org/10.7868/S001679401606016X).

Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е., Зверев В.Л. Влияние параметров плазмы солнечного ветра на интенсивность изолированных магнитосферных суббурь. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018. Т. 58, № 3. С. 311–323. DOI: [10.7868/S001679401803001X](https://doi.org/10.7868/S001679401803001X).

Сергеев В.А., Цыганенко Н.А. *Магнитосфера Земли*. М.: Наука, 1980. 174 с.

Фельдштейн Я.И. Некоторые вопросы морфологии полярных сияний и магнитных возмущений в высоких широтах. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1963. Т. 3, № 2. С. 227–239.

Хорошева О.В. Суточный дрейф замкнутого кольца полярных сияний. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1962. Т. 2, № 5. С. 839–850.

Akasofu S.-I. The development of the auroral substorm. *Planet. Space Sci.* 1964. Vol. 12. P. 273–282.

Borovsky J.E., Nemzek R.J., Belian R.D. The occurrence rate of magnetospheric substorm onsets: Random and periodic substorms. *J. Geophys. Res.* 1993. Vol. 98, A3. P. 3807–3813. DOI: [10.1029/92JA02556](https://doi.org/10.1029/92JA02556).

Chu X., McPherron R.L., Hsu T.-S., Angelopoulos V. Solar cycle dependence of substorm occurrence and duration: Implications for onset. *J. Geophys. Res.* 2015. Vol. 120. P. 2808–2818. DOI: [10.1002/2015JA021104](https://doi.org/10.1002/2015JA021104).

Frey H.U., Mende S.B., Angelopoulos V., Donovan E.F. Substorm onset observations by IMAGE-FUV. *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109, A10304. DOI: [10.1029/2004JA010607](https://doi.org/10.1029/2004JA010607).

Gjerloev J.W. The SuperMAG data processing technique. *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117, A09213. DOI: [10.1029/2012JA017683](https://doi.org/10.1029/2012JA017683).

Kamide Y., Perreault P.D., Akasofu S.-I., Winningham J.D. Dependence of substorm occurrence probability on the interplanetary magnetic field and on the size of the auroral oval. *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82. P. 5521–5528. DOI: [10.1029/JA082i035p05521](https://doi.org/10.1029/JA082i035p05521).

Liou K., Newell P.T., Sibeck D.G., et al. Observation of IMF and seasonal effects in the location of auroral substorm onset. *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 106, no A4. P. 5799–5810.

Liou K., Newell P.T., Zhang Y.-L., Paxton L.J. Statistical comparison of isolated and non-isolated auroral substorms. *J. Geophys. Res.* 2013. Vol. 118. P. 2466–2477. DOI: [10.1002/jgra.50218](https://doi.org/10.1002/jgra.50218).

McPherron R.L. Growth phase of magnetospheric substorms. *J. Geophys. Res.* 1970. Vol. 75, no. 28. P. 5592–5599.

McPherron R.L., Chu X. The Midlatitude Positive Bay index and the statistics of substorm occurrence. *J. Geophys. Res.* 2018. Vol. 123. P. 2831–2850. DOI: [10.1002/2017JA024766](https://doi.org/10.1002/2017JA024766).

Newell P.T., Gjerloev J.W., Mitchell E.J. Space climate implications from substorm frequency. *J. Geophys. Res.* 2013. Vol. 118. P. 6254–6265. DOI: [10.1002/jgra.50597](https://doi.org/10.1002/jgra.50597).

Sandhu J.K., Rae I.J., Freeman M.P., et al. Substorm-ring current coupling: a comparison of isolated and compound substorms. *J. Geophys. Res.* 2019. Vol. 124. P. 6776–6791. DOI: [10.1029/2019JA026766](https://doi.org/10.1029/2019JA026766).

Sergeev V.A., Angelopoulos V., Nakamura R. Recent advances in understanding substorm dynamics. *Geophys. Res. Lett.* 2012. Vol. 39. L05101. DOI: [10.1029/2012GL050859](https://doi.org/10.1029/2012GL050859).

Tanskanen E.I. A comprehensive high-throughput analysis of substorms observed by IMAGE magnetometer network: Years 1993–2003 examined. *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114. A05204. DOI: [10.1029/2008JA013682](https://doi.org/10.1029/2008JA013682).

URL: <http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/sunspot/> (дата обращения 5 июля 2023 г.).

URL: <https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/> (дата обращения 5 июля 2023 г.).

URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html> (дата обращения 5 июля 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

Баишев Д.Г., Макаров Г.А. Изолированные суббури по данным магнитных измерений в Тикси в период минимальной солнечной активности. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 4. С. 86–90. DOI: [10.12737/szf-94202310](https://doi.org/10.12737/szf-94202310).