

**ДИНАМИКА ПОЛЯРИЗАЦИИ Pi2-ПУЛЬСАЦИЙ В СРЕДНИХ ШИРОТАХ
ПРИ РАЗВИТИИ СУББУРЬ В АВРОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ****POLARIZATION DYNAMICS OF Pi2 PULSATIONS
AT MIDLATITUDES DURING DEVELOPMENT
OF SUBSTORMS IN THE AURORAL ZONE****Р.А. Рахматулин***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, rav@iszf.irk.ru***А.Ю. Пашинин***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, pash@iszf.irk.ru***R.A. Rakhmatulin***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, rav@iszf.irk.ru***A.Yu. Pashinin***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, pash@iszf.irk.ru*

Аннотация. Исследованы изменения ориентации главной оси эллипса поляризации иррегулярных геомагнитных пульсаций Pi2, наблюдаемых на средних широтах, во время суббурового возмущения, развивающегося в авроральной зоне российского сектора Арктики. Обнаружена зависимость ориентации эллипса поляризации от долготы развития соответствующей суббури. Проводится сопоставление результатов современных исследований с более ранними результатами аналогичных исследований по материалам североамериканского континента. Делается вывод об общем подобии результатов, а незначительное расхождение может быть обусловлено особенностями геологического строения земной коры в российском секторе Арктики.

Ключевые слова: магнитосфера, геомагнитные возмущения, авроральная суббуря, геомагнитные пульсации Pi2, поляризация геомагнитных пульсаций, российский сектор Арктики, магнитные обсерватории.

Abstract. We examine the changes in the orientation of the major axis of the polarization ellipse of irregular geomagnetic pulsations Pi2, observed at midlatitudes during a substorm disturbance developing in the auroral zone of the Russian Arctic sector. We have found the dependence of the polarization ellipse orientation on the longitude of a corresponding substorm. The results of current studies are compared with earlier results of similar studies using data on the North American continent. We have concluded that the results are similar in general, with a slight discrepancy which may be due to peculiarities of the geological structure of the earth crust in the Russian Arctic sector.

Keywords: magnetosphere, geomagnetic disturbances, auroral substorm, geomagnetic pulsations Pi2, polarization of geomagnetic pulsations, Russian Arctic sector, magnetic observatories.

ВВЕДЕНИЕ

Начало активной фазы суббури в авроральной зоне сопровождается генерацией широкополосного всплеска иррегулярных пульсаций Pi2+Pi1B. В средних широтах Pi2 наблюдаются как затухающие цуги колебаний в диапазоне периодов 45–200 с [Пудовкин и др., 1976; Кошелевский и др., 1972] преимущественно в полуночном секторе магнитосферы [Распопов, Троицкая, 1974; Kuwashima, 1981; Shiohara et al., 2002]. На рис. 1 показаны динамические спектры иррегулярных геомагнитных пульсаций, одновременно зарегистрированных в высоких и средних широтах при развитии активной фазы суббури 7 марта 2006 г. Отчетливо видно, что, если в высоких широтах наблюдается широкополосный всплеск иррегулярных пульсаций Pi2+Pi1b, в средних широтах преобладают две спектральные полосы — около 35 с и более длиннопериодная (~125 с) составляющая, как это было показано ранее в наших работах по результатам экспериментов на Норильском меридиане [Рахматулин, Петровский, 1994].

Предыдущие исследования морфологических характеристик развития пульсаций Pi2 в средних широтах, в частности, поведения поляризационных характеристик колебаний, показали, что главная ось эллипса поляризации пульсаций Pi2 в горизонтальной плоскости в средних широтах меняет свое направление от восточного к западному при переходе через полуночный меридиан [Распопов, Троицкая, 1974]. Такие исследования проводились на большом статистическом материале, но без учета конкретных условий, вызывающих возбуждение определенного всплеска иррегулярных пульсаций Pi2, и без учета долготы положения активной области в авроральной зоне.

В данной работе мы провели исследование, чтобы определить по данным среднеширотной станции, как при развитии конкретной суббури меняется в пространстве направление главной оси эллипса поляризации иррегулярных пульсаций Pi2. При этом мы выясняли, влияет ли долгота области локализации авроральных возмущений на ориентацию эллипса

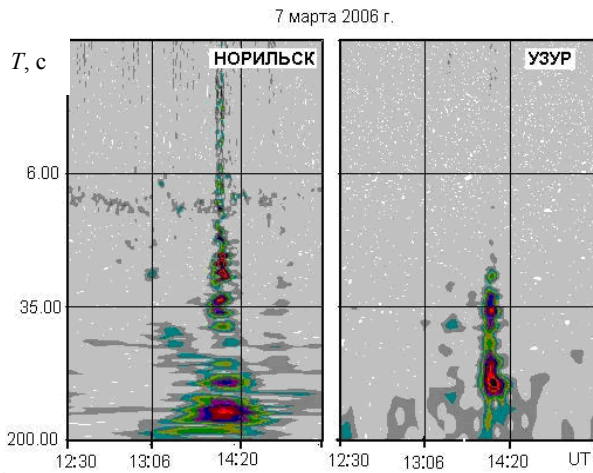


Рис. 1. Динамические спектры пульсаций Pi2, одновременно наблюдаемых в высоких (ст. Норильск) и средних (ст. Узур) широтах в период развития активной фазы суббури

поляризации, так как известно, что при развитии авроральных возмущений активная область перемещается с востока на запад. Перед нами стояла конкретная задача — определить, как меняется направление главной оси эллипса поляризации Pi2-колебаний в средних широтах при перемещении активной области в авроральной зоне в азимутальном направлении.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Для решения этой задачи необходимы координированные наблюдения магнитосферных процессов в высоких и средних широтах. Возможны два подхода к исследованию. Первый — это анализ развития суббури по магнитограммам одной высокоширотной станции с привлечением материалов регистрации пульсаций на глобальной сети среднеширотных обсерваторий. Пример такого анализа показан на рис. 2, представляющем записи пульсаций на сети среднеширотных обсерваторий в момент начала суббури на ст.Тикси.

Представлены фрагменты аналоговых записей геомагнитных пульсаций и соответствующие им динамические спектры колебаний, цифрами указана геомагнитная долгота станций. Внизу приведен фрагмент магнитограммы ст. Тикси. Начало активной фазы суббури на этой станции в 14:18 UT сопровождается генерацией иррегулярных пульсаций Pi2, надежно регистрируемых на всех станциях. Практически все колебания начинаются одновременно и имеют вид классического цуга. Заметим, что фактически мы наблюдаем глобальное возбуждение Pi2-пульсаций в средних широтах. Ранее мы обсуждали это в наших работах [Rakhmatulin et al., 2000, 2005].

Второй подход включает в себя анализ возбуждения пульсаций по данным одной среднеширотной станции при появлении суббурь в различных долготных секторах с использованием магнитограмм всех авроральных станций, как это показано на рис. 3.

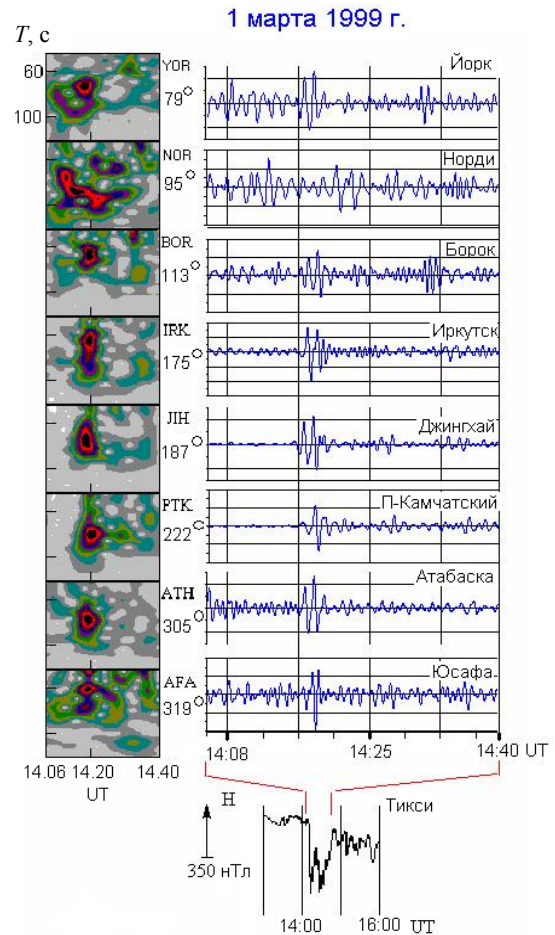


Рис. 2. Наблюдение Pi2-пульсаций в средних широтах во время развития активной фазы суббури в ночном секторе на ст. Тикси. Слева — динамические спектры, справа — фрагменты аналоговой записи пульсаций, внизу — H-компонента магнитограммы ст. Тикси

Очевидно, второй путь легче реализовать, так как магнитограммы высокоширотных станций более доступны, чем материалы наблюдения геомагнитных пульсаций на практически глобальной сети среднеширотных обсерваторий. К этому следует добавить, что высокоширотные обсерватории, производящие регистрацию вариаций магнитного поля, оснащены практически идентичной аппаратурой, чего нельзя сказать об аппаратуре для регистрации геомагнитных пульсаций. Поэтому для реализации поставленных целей был выбран второй подход. В табл. 1 приводятся географические координаты станций, используемых для анализа.

Таблица 1
Координаты обсерваторий, используемых для анализа

№	Обсерватория	Географическая широта	Географическая долгота
1	Иркутск (п. Патроны)	52° 09' N	104° 28' E
2	Узур	53° 19' N	107° 44' E
3	Норильск	69° 21' N	88° 21' E
4	Исток	70° 01' N	88° 00' E
5	Монды	51° 37' N	100° 54' E
6	Диксон	73° 33' N	80° 34' E
7	Тикси	72° 35' N	129° 00' E
8	Певек	70° 06' N	170° 56' E
9	Ловозеро	69° 58' N	35° 01' E
10	Амдерма	69° 29' N	61° 26' E
11	Сороа (Куба)	22° 48' N	277° 00' E

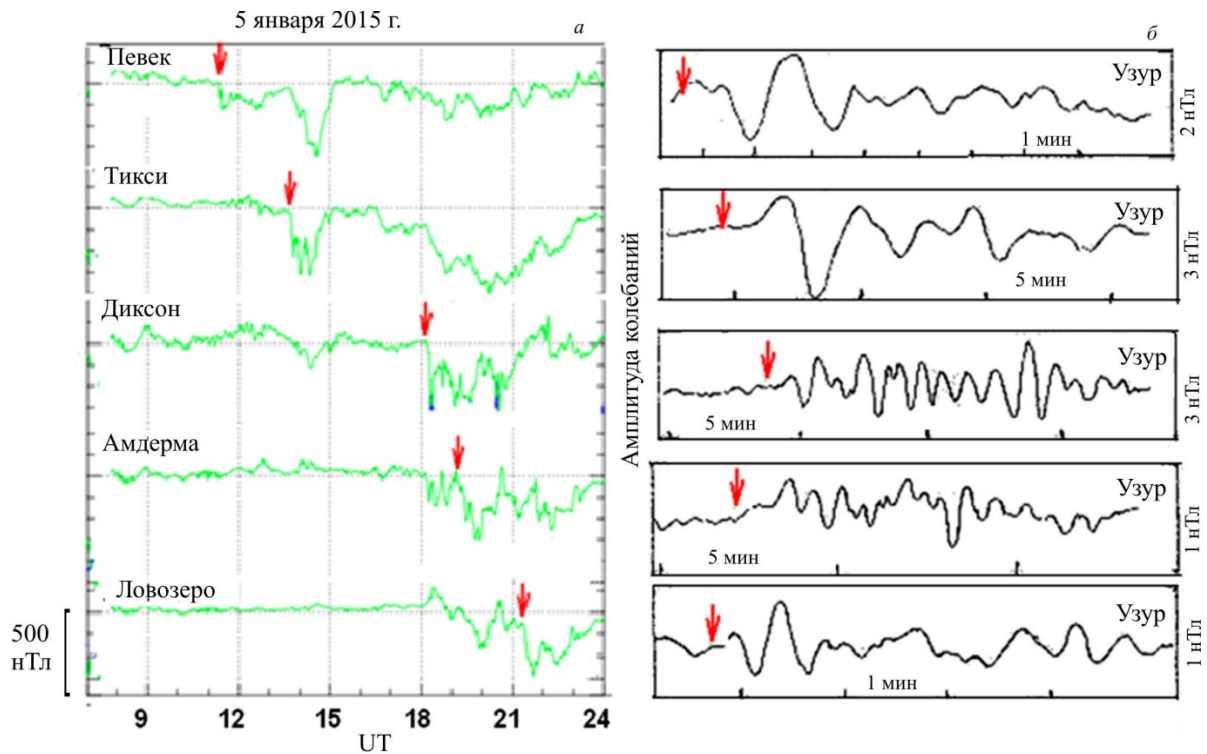


Рис. 3. Развитие магнитных возмущений 5 января 2015 г.: H -компонента по данным станций авроральной зоны (а); геомагнитные пульсации в 1-мин и 5-мин масштабах на ст. Иркутск (Узур) (б); (стрелками отмечены моменты начала геомагнитных пульсаций Pi2 на ст. Иркутск, а на аналоговых записях пульсаций — конкретное время начала колебаний в каждом событии)

Параметры пульсаций Pi2 (амплитуда, спектр, ориентация главной оси эллипса поляризации) оценивались по материалам наблюдений на среднеширотных станциях Монды и Узур, в некоторых случаях привлекались материалы наблюдений геомагнитных пульсаций на высокоширотных станциях Норильск и Исток. Параметры пульсаций сопоставлялись с данными о развитии авроральных суббурь на разных долготах российского сектора. Локализация суббуревых возмущений определялась по магнитограммам арктических станций, заимствованным с сайта Мирового центра данных [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/plot_realtime/quick/index.html].

Анализ экспериментального материала проводился по следующей схеме. По данным магнитограмм высокоширотных обсерваторий отбирались случаи (интервалы времени), когда возмущения были локализованы на одной из зональных станций, т. е. величина бухты H -компоненты на этой станции существенно превышала возмущения на других станциях), либо когда возмущения перемещались с востока на запад при развитии глобального возмущения [Kuwashima, 1981]. Затем в пределах выбранных интервалов по записям геомагнитных пульсаций на станциях Монды или Узур определялись моменты начал всех цугов Pi2. Примеры сопоставления таких данных показаны на рис. 3, где изображены H -компоненты магнитограмм высокоширотных обсерваторий (а) и аналоговые записи геомагнитных пульсаций (б).

Видно, что область суббуревой активности перемещалась с востока на запад (начало возмущения

на каждой станции отмечено стрелкой). При этом начало активизации суббуревых возмущения на каждой станции сопровождалось возбуждением иррегулярных пульсаций Pi2 в средних широтах (обс. Узур).

Для обработки экспериментального материала была разработана специальная методика. На рис. 4 изображена последовательность операций при обработке экспериментального материала.

С помощью программы спектрально-временного анализа (СВАН) строится динамический спектр интересующих нас колебаний, (пример показан на рис. 4, а). Далее вырезается нужный участок данных и обрабатывается специальным фильтром, вырезающим частоты, соответствующие динамическому спектру сигнала. После этого строится осциллограмма колебаний (рис. 4, б). Наконец, для получения поляризационных характеристик строится эллипс поляризации (рис. 4, в) и измеряется угол наклона главной оси эллипса поляризации α к горизонтальной оси, за которую принято направление восток — запад.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Было проанализировано несколько десятков случаев, часть из которых включена в табл. 2. В первом столбце приводятся названия авроральных станций, магнитные данные которых использовались в работе, во втором — географические координаты этих станций, в третьем и четвертом столбцах — дата и время начала суббури в авроральных широтах и начала

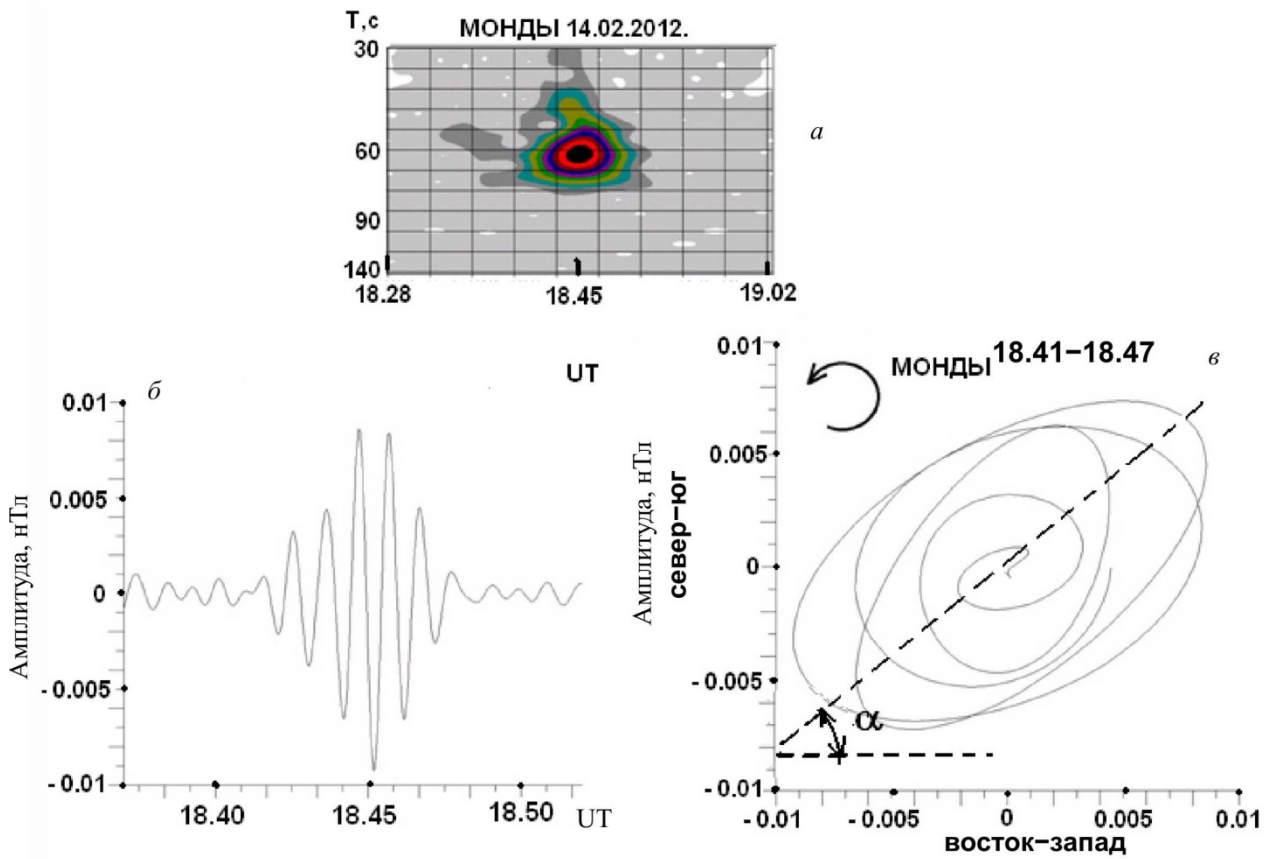


Рис. 4. Пример процедуры обработки экспериментального материала (пояснение в тексте)

Таблица 2

Обсерватория	Географические координаты	Дата	Время начала суббури и P _{i2} , UT	Угол α , град
Певек (РВК)	70°06' N 170° 56' E	10.01.2015	14.10	55
		12.01.2015	11.47	60
		05.03.2015	11.46	60
		27.01.2015	12.30	50
		22.01.2015	12.15	60
Тикси (ТИК)	72°35' N 129° 00' E	10.01.2015	14.10	55
		10.01.2015	12.20	75
		26.01.2015	16.37	70
		30.01.2015	16.18	70
		30.01.2015	17.27	60
		05.03.2015	15.15	70
		23.12.2014	20.44	70
Диксон (ДИК)	73°33' N 80° 34' E	22.01.2015	11.07	70
		12.01.2015	15.40	85
		30.01.2015	18.01	90
		30.01.2015	18.09	90
		05.03.2015	16.15	85
Амдерма (АМД)	69°29' N 61° 26' E	22.01.2015	19.06	90
		26.01.2015	17.00	120
		30.01.2015	19.50	110
Ловозеро (ЛОВ)	69°58' N 35° 01' E	30.01.2015	17.45	105
			20.12	140

соответствующего цуга иррегулярных пульсаций Pi2 в обл. Монды. В последнем столбце приводятся рассчитанные по эллипсам поляризации значения угла α .

По этим экспериментальным данным была построена зависимость угла α от долготы развития соответствующей суббури (рис. 5).

Обратимся теперь к результатам более ранних исследований, проводившихся нами совместно с кубинскими коллегами по материалам наблюдений на североамериканском континенте. Такие исследования мы проводили в 90-х гг. прошлого столетия в рамках Программы сотрудничества академий наук соцстран по планетарной геофизике (КАПГ) [Коста и др. 1984]. Использовались данные наблюдений геомагнитных пульсаций на кубинской станции Со-роа, а материалы по вариациям магнитного поля в авроральных широтах были заимствованы из бюллетеней WDC [Allen et al., 1977].

После проведения серии экспериментов мы получили зависимость ориентации главного угла эллипса поляризации Pi2 пульсаций для североамериканского континента, которая представлена на рис. 6.

Сравнительный анализ данных, полученных по материалам американского и российского секторов Арктики, показан на рис. 7. Отметим, что нулевая точка на шкале долгот соответствует меридианам станций Со-роа (277° 00' E) и Монды (100° 54' E).

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 7, позволяет сделать следующий вывод. Зависимость угла ориентации эллипсов поляризации от долготы

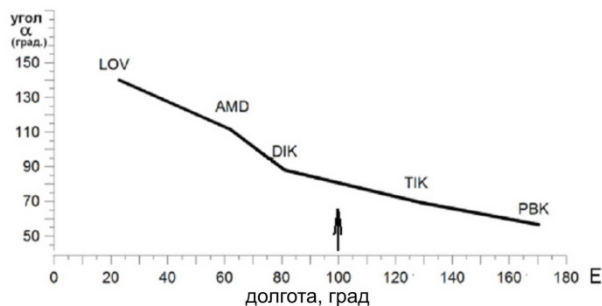


Рис. 5. Зависимость угла наклона главной оси эллипса поляризации Pi2-колебаний от долготы развития авроральной суббури. Стрелкой отмечен меридиан станции Монды

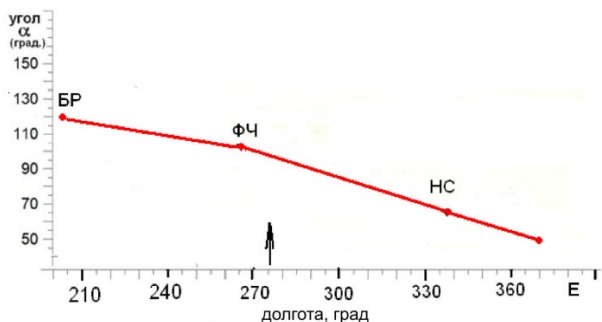


Рис. 6. Ориентация главной оси эллипса поляризации Pi2 в Сороя (угол α) в зависимости от долготы развития магнитной бухты в высоких широтах по данным ст. Барроу (БР), Форт-Черчилль (ФЧ), Нарсарсуак (НС). Стрелкой отмечен меридиан ст. Сороя

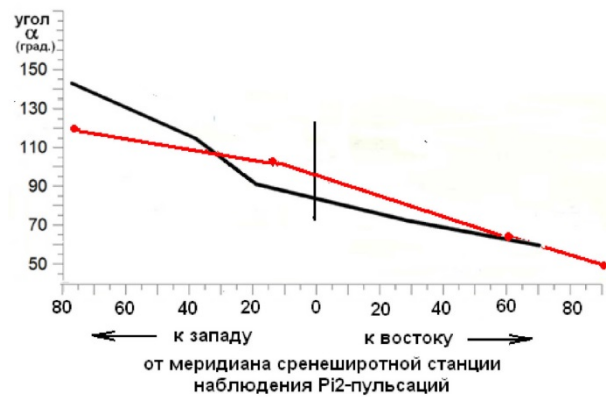


Рис. 7. Сравнительный анализ зависимости угла наклона главной оси эллипса поляризации Pi2-пульсаций от долготы развития соответствующей суббури по материалам российского (черная линия) и американского (красная линия) секторов Арктики

развития суббури имеет аналогичный вид для северных регионов американского и евразийского континентов. Наблюдаются незначительные расхождения, которые могут быть обусловлены влиянием геологических структур и присутствием значительных магнитных аномалий на Таймыре [Краковецкий и др., 1982; Попов и др., 2010].

ПРИМЕР МОНИТОРИНГА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ СУББУРИ

Иллюстрацией предложенной методики может служить случай развития ряда последовательных суббурь в авроральной зоне с постепенным перемещением области возмущения с востока на запад 5 марта 2015 г. (рис. 8). Видно, что по мере развития возмущений и перемещения области активизации главные оси эллипсов поляризации поворачиваются, как бы «отслеживая» перемещение активной области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Завершая анализ проведенных исследований, можно сделать следующий вывод о возможном практическом применении полученных результатов. Зависимости, представленные на рис. 7, позволяют с определенной степенью достоверности оценить долготу начала развития суббури в авроральной зоне по наблюдениям иррегулярных пульсаций в средних широтах. Это актуально в тех случаях, когда по каким-либо причинам отсутствует регистрация вариаций магнитного поля в высоких широтах либо суббуря произошла в регионе, где нет магнитной обсерватории.

В заключение отметим, что подобная методика уместна в случаях слабой и умеренной магнитной активности. При значительной магнитной активности область возмущения может захватывать пространство по долготе до 90–120° и в такой ситуации трудно определить приоритетное направление главных осей эллипсов поляризации геомагнитных пульсаций Pi2.

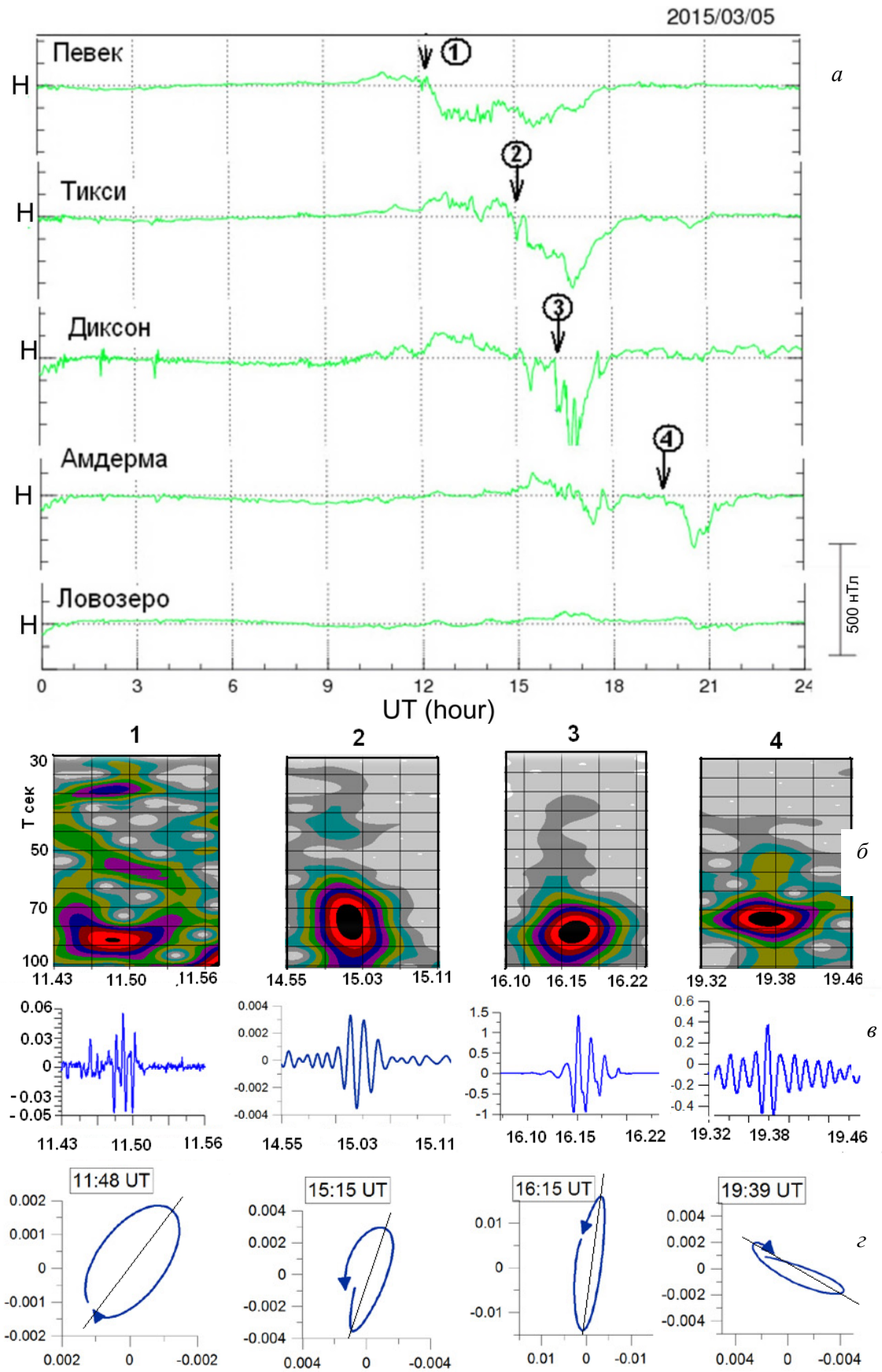


Рис. 8. Развитие магнитных возмущений в авральной зоне (а) и синхронные наблюдения иррегулярных пульсаций в обл. Монды: б — динамические спектры, в — аналоговая запись колебаний, г — эллипсы поляризации иррегулярных пульсаций

Исследование выполнено в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16, работа А.Ю. Пашина была поддержана грантом РФФИ 16-05-00631. Результаты получены с использованием оборудования магнитометрического комплекса Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Коста А.Д., Пархомов В.А., Рахматулин Р.А., Родригес Ф. Влияние долготной локализации суббури на параметры низкоширотных Pi2 // Иссл. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. 1984. Вып. 70. С. 171–177.

Кошелевский В.К., Распопов О.М., Старков Г.В. Связь параметров геомагнитных пульсаций Pi2 с процессами в зоне сияний // Геомагнетизм и аэронамия. 1972. Т. 12, № 5. С. 886–891.

Краковецкий Ю.К., Платонов О.И., Попов Л.Н., Доронина И.П. Пространственное распределение полярных сияний и его взаимосвязь со структурой земной коры // Иссл. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. 1982. Вып. 62. С. 155–164.

Попов Л.Н., Краковецкий Ю.К., Захаренко В.Н., Парначёв В.П., Одинцов Н.М. О выявлении геологических структур дистанционным методом ионосферно-теллурического профилирования (на примере северных районов Сибири) // Вестник Томского государственного университета. Сер. Науки о Земле. 2010. № 399. С. 205–209.

Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Ч. 2. Л.: изд-во ЛГУ, 1976. 270 с.

Распопов О.М., Троицкая В.М. Развитие суббури в геомагнитных пульсациях. Высокоширотные геофизические явления. Л., 1974. С. 232–247.

Рахматулин Р.А., Петровский М.А. Исследование динамических спектров высокоширотных Pi2-пульсаций // Иссл. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. 1994. Вып. 103. С. 49–56.

Allen J., Abston C.C., Morris L.D. Geomagnetic Data for February, March 1976. Rep.UAG-62, 63. World Data Center for Solar-Terr. Phys. 1977. 55 p.

Kuwashima M.A. A model of magnetic Pi2 pulsations based on ULF observation from high to middle latitudes on the ground // Memoirs of National Institute of Polar Res. 1981. Spec. N 16. P. 15–21.

Rakhmatulin R.A., Pashinin A.Y., Hayashi K. The observation of global Pi2 pulsation in the mid-latitudes during small substorms // Proc. the 5 Intern. Conference on Substorms. St. Petersburg, Russia, July 2000. ESA SP-443. P. 561–564.

Rakhmatulin R.A., Pashinin A.Yu., Zhao Hua. An investigation of near-equatorial geomagnetic Pi2 pulsations // Chinese J. Space Sci. 2005. V. 25, N 5. P. 430–432.

Shiokawa K., Yumoto K., Olson J.V. Multiple auroral brightening and associated Pi2 pulsations // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29, N 11. P. 32/1–32/4.

URL: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/plot_realtime/quick/index.html (дата обращения 23 ноября 2016 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 23 ноября 2017 г.).

REFERENCES

Allen J., Abston C.C., Morris L.D. Geomagnetic Data for February, March 1976. Rep.UAG-62, 63. World Data Center for Solar-Terr. Phys. 1977, p. 55.

Costa A.D., Parkhomov V. A., Rakhmatulin R.A., Rodriguez F. Influence of longitudinal localization of a substorm on low-latitude Pi2 parameters. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Res. on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Phys.]. 1984, iss. 70, pp. 171–177. (In Russian).

Koshelevsky V.K., Raspopov O.M., Starkov G.V. The connection of parameters of geomagnetic pulsations Pi2 with processes in the auroral zone. *Geomagnetizm i aeronomiya*. [Geomagnetism and Aeronomy]. 1972, vol. 12, no. 5, pp. 886–891. (In Russian).

Krakovetsky Yu.K., Platonov O.I., Popov L.N., Doronina I.P. Aurora spatial distribution of a polar light and its relation with the Earth crust structure. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Res. on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Phys.]. 1982, iss. 62, pp. 155–164. (In Russian).

Kuwashima M.A. A model of magnetic Pi2 pulsations based on ULF observation from high to middle latitudes on the ground. *Memoirs of National Institute of Polar Res.* 1981. Spec. № 16, pp. 15–21.

Popov L.N., Krakovetsky Yu.K., Zakharenko V.N., Parnachev V.P., Odintsov N.M. On revealing geological structures by the distant method of ionosphere-telluric profiling (by example of northern districts of Siberia). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Nauki o Zemle* [Tomsk State University Bull. Ser. Earth Sci.]. 2010, no. 399, pp. 205–209. (In Russian).

Pudovkin M.I., Raspopov O.M., Kleymenova N.G. *Vozmushcheniya elektromagnitnogo polya Zemli*. Chast 2. [Disturbances of the Earth's electromagnetic field. Part 2]. Leningrad, LGU Publ., 1976, 270 p. (In Russian).

Rakhmatulin R.A., Pashinin A.Y., Hayashi K. The observation of global Pi2 pulsation in the mid-latitudes during small substorms. *Proc. the 5 Intern. Conference on Substorms*. St. Petersburg, Russia, July 2000, ESA SP-443, pp. 561–564.

Rakhmatulin R.A., Pashinin A.Yu., Zhao Hua. An investigation of near-equatorial geomagnetic Pi2 pulsations. *Chinese J. Space Sci.* 2005, vol. 25, no 5, pp. 430–432.

Rakhmatulin R.A., Petrovsky M.A. Research into dynamic spectra of high-latitude Pi2-pulsations. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Res. on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Phys.]. 1994, iss. 103, pp. 49–56. (In Russian).

Raspopov O.M., Troitskaya V.M. *Razvitie subburi v geomagnitnykh pulsatsiyakh*. *Vysokoshirotnye geofizicheskie yavleniya* [Substorm Development in Geomagnetic Pulsations. High-latitude Geophysical Phenomena]. Leningrad, 1974, pp. 232–247. (In Russian).

Shiokawa K., Yumoto K., Olson J.V. Multiple auroral brightening and associated Pi2 pulsations. *Geophys. Res. Lett.* 2002, vol. 29, no 11, pp. 32/1–32/4.

URL: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/plot_realtime/quick/index.html (accessed November 23, 2016).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (accessed November 23, 2017).

Как цитировать эту статью

Рахматулин Р.А., Пашина А.Ю. Динамика поляризации Pi2-пульсаций в средних широтах при развитии суббурь в авральной зоне. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 3. С. 61–67. DOI: [10.12737/szf-43201807](https://doi.org/10.12737/szf-43201807).