

УДК 550.385.1;551.521.64

ПРИМЕНЕНИЕ НОВОЙ МЕТОДИКИ ВЕЙВЛЕТ-ДЕКОМПОЗИЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА ГЕОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ И ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2021 г. О. В. Мандрикова^{1, *}, А. И. Родоманская^{1, **}, Б. С. Мандрикова^{1, ***}

¹Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (ИКИР ДВО РАН),
с. Паратунка, Камчатский край, Россия

*e-mail: oksanam1@mail.ru

**e-mail: pantina_anastasia@mail.ru

***e-mail: 555bs5@mail.ru

Поступила в редакцию 25.06.2020 г.

После доработки 14.12.2020 г.

Принята к публикации 28.01.2021 г.

Исследуются возможности применения разработанной авторами методики вейвлет-декомпозиции для анализа геомагнитных данных и вариаций космических лучей. Методика, путем использования адаптивных пороговых функций, позволяет выделить нестационарные короткопериодные (от 1×10^{-3} Гц и более) изменения в данных и оценить их параметры. В работе использовались данные сети наземных магнитометров (www.intermagnet.org) и данные нейтронных мониторов (<http://cos-gau.unibe.ch/>). На примере магнитных бурь 9 июля и 27 сентября 2017 г. показаны преимущества методики, экспериментально доказана ее эффективность для обнаружения малоамплитудных аномальных изменений в разнородных данных. Детально рассмотрена динамика вариаций геомагнитного поля на меридионально расположенных станциях и в авроральной зоне, получены картины возникновения и распространения геомагнитных возмущений, предшествующих и сопутствующих интервалам магнитных бурь. Применение методики позволило четко детектировать и оценить слабые кратковременные возрастания геомагнитной активности, наблюдаемые на фоне повышенных интенсивности космических лучей и предшествующие началу магнитных бурь. Отмечено, что выделенные геомагнитные возмущения происходили синхронно на станциях от высоких широт до экватора и коррелировали с периодами поворотов на юг B_z -компоненты ММП и повышениями авроральной активности. В космических лучах в эти интервалы наблюдались Форбуш-эффекты малой амплитуды, которые детектированы путем применения методики.

DOI: 10.31857/S0016794021030111

1. ВВЕДЕНИЕ

Анализ временных рядов геофизических параметров составляет важную основу методов изучения процессов, протекающих в околоземном пространстве в периоды повышенной солнечной активности и магнитных бурь. Проблема процесса обработки и анализа прямых экспериментальных данных связана с их сложной нерегулярной структурой, наличием особенностей различной формы, амплитуды и длительности, а также влиянием шумов. Формирующиеся в геомагнитных данных локальные структуры определяются возмущенностью геомагнитного поля и содержат важную информацию о протекающих процессах в магнитосфере [Зайцев и др., 2002; Зеленский и др., 2017; Анисимов и др., 2018].

Негативное воздействие геомагнитных возмущений на технические объекты (системы теле-,

радио и спутниковой связи, электрические сети и др.) [Старков, 2000; Лазутин, 2012; Кузнецов, 2014; Дэспирак и др., 2020] определяет прикладную значимость исследования и требует создания методов анализа данных, обеспечивающих своевременное обнаружение аномальных изменений. Последние исследования показывают, например, [Лазутин, 2012], что главным источником негативного воздействия являются геомагнитные пульсации (короткопериодные вариации геомагнитного поля), возникающие в периоды магнитосферных суббурь в авроральной зоне [Клейменова, 2013]. С ростом геомагнитной активности авроральный овал расширяется к экватору и захватывает области средних широт. Но ключевое значение имеют полярная и авроральная зоны, в которых регистрируются самые мощные магнитные возмущения, и суббури являются весьма частым явлением.

Выделение и идентификация геомагнитных возмущений является сложной задачей. Традиционные методы анализа временных рядов, основанные на процедурах сглаживания [Ni et al., 2017], и спектральные методы [Vipindas et al., 2016; Livada et al., 2018], не позволяют детально исследовать быстро-изменяющую структуру вариаций геомагнитного поля и приводят к потере значимой информации. Например, в работе [Зелинский и др., 2017] анализируются возможности методов чирплет- и варблет-преобразований для изучения тонких структур геомагнитных данных. Авторами показано преимущество нового обобщенного варблет-преобразования для анализа характеристик геомагнитных пульсаций, применение которого позволило оценить мгновенную частоту сигнала. Широкое применение для анализа геофизических данных получил метод вейвлет-преобразования [Chui, 1992; Daubechies, 1992], который позволяет изучить сложные структуры данных и исследовать нестационарные изменения [Астафьева, 1996; Nose et al., 1998; Nose, 1999; Hafez et al., 2012 и др.]. На основе вейвлет-преобразования разработан автоматизированный метод выделения геомагнитных пульсаций [Nose et al., 1998; Nose, 1999], предложен алгоритм автоматического обнаружения магнитных бурь с повышенным риском формирования геомагнитно-индуцированных токов [Bailey and Leonhardt, 2016], разработан метод расчета индекса геомагнитной активности WISA [Jach et al., 2006; Xu et al., 2008] и др. В данной работе применяется новая методика вейвлет-декомпозиции данных, впервые предложенная в статье [Mandrikova et al., 2019] и позволяющая выделять нестационарные короткопериодные изменения в данных и оценивать их параметры. Введенные в рассмотрение адаптивные пороговые функции дают возможность детектировать резкие внезапные изменения в данных, возникающие в локальном временном диапазоне. В данной работе представлены результаты применения методики для анализа вариаций геомагнитного поля в периоды слабых магнитных бурь 9 июля и 27 сентября 2017 г. Выбор событий основывался на изучении возможности применения методики для детектирования слабых геомагнитных возмущений. С этой же целью в статье рассмотрены периоды спокойного геомагнитного поля, в разделе описания методики. Для получения пространственно-временной картины возникновения и распространения геомагнитных возмущений анализировались данные меридиональной цепочки станций (Якутск – YAK, Паратунка – PET, Россия; Гуам – GUA, США, (<http://www.intermagnet.org>)) и сети станций авроральной зоны (Абиско – ABK, Швеция; Барроу – BRW, США; Колледж – CMO, США; Форт Черчилл – FCC, Канада; Нарсарсуак – NAQ, Гренландия; Йеллоунайф – YKC, Канада, ([\[www.intermagnet.org\]\(http://www.intermagnet.org\)\), Саникилуак – SNK, Канада, \(<http://www.geomag.nrcan.gc.ca/index-en.php>\) и Леервогер – LVR, Исландия \(<http://cygnus.raunvis.hi.is/~halo/lrv.html>\)\).](http://</p></div><div data-bbox=)

Результаты обработки геомагнитных данных сопоставлялись с данными космических лучей, полученными сетью наземных станций нейтронных мониторов (<http://cosray.unibe.ch/>). Наблюдаемые на поверхности Земли вариации космических лучей являются интегральным результатом различных солнечных, гелиосферных, магнитосферных и атмосферных явлений [Топтыгин, 1983; Мелкумян и др., 2018а; Мелкумян и др., 2018б]. Известно, наиболее существенные изменения в параметрах космических лучей вызывают выбросы коронарной массы и следующие за ними изменения в параметрах межпланетного магнитного поля и солнечного ветра [Абунин и др., 2012; Vecchio et al., 2012]. Поэтому изучение вариаций космических лучей позволяет получить ценную информацию о процессах в околоземном пространстве и в магнитосфере в возмущенные периоды. Обработка данных космических лучей выполнялась аналогичным образом, с использованием разработанной методики.

Работа является продолжением исследований авторов [Мандрикова и др., 2013; Mandrikova et al., 2014; 2018] и направлена на создание методов анализа геофизических данных и обнаружения аномальных изменений, характеризующих нестационарные процессы в околоземном пространстве и в магнитосфере Земли. Целью данной статьи является исследование новой методики, основанной на совместном применении операций вейвлет-декомпозиции данных и пороговых функций. Основное внимание уделялось возможности детектирования малоамплитудных короткопериодных изменений в данных, эффективное обнаружение которых важно в задачах геофизического мониторинга, например [Богоутдинов и др., 2007; Soloviev et al., 2016]).

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В работе выполнена обработка геомагнитных данных минутного разрешения станций, представленных в табл. 1. Также в работе использовались минутные данные нейтронных мониторов станций: Инувик (координаты: 68.36, –133.72, США) и Туле (координаты: 76.5, –68.7, США) (<http://cosray.unibe.ch/>). Выделенные периоды аномальных изменений в динамике космических лучей за 2017 г. сопоставлялись с данными ресурса (<http://spaceweather.izmiran.ru/rus/fds2015.html>).

Использовались магнитные данные, полученные в обсерваториях в соответствии со стандартами INTERMAGNET (www.intermagnet.org), т.е. данные, в которых отсутствует шум, скачки и дли-

Таблица 1. Станции, данные которых использовались в исследовании

Станция	IAGA код	Географическая широта	Географическая долгота	Геомагнитная широта	Геомагнитная долгота	Местное время (LT)
Барроу	BRW	71°19.5' N	156°37.2' W	70°06.0' N	110°34.2' W	UTC-8
Колледж	CMO	64°52.2' N	147°51.5' W	68°33.6' N	57°13.2' W	UTC-8
Йеллоунайф	YKC	62°28.8' N	114°28.8' W	67°12.0' N	28°51.0' W	UTC-6
Форт Черчилл	FCC	58°45.5' N	94°05.3' W	67°12.0' N	28°51.0' W	UTC-5
Санкилуак	SNK	56°30.0' N	79°12.0' W	65°43.2' N	08°17.4' W	UTC-4
Нарсарсуак	NAQ	61°11.7' N	45°25.0' W	69°00.0' N	38°49.2' W	UTC-2
Леервогер	LVR	64°10.8' N	21°42.0' W	68°42.6' N	70°24.0' W	UTC+0
Абиско	ABK	68°21.7' N	18°43.4' E	66°04.8' N	113°53.4' E	UTC+2
Якутск	YAK	61°57.6' N	129°39.4' E	52°54.0' N	162°23.4' E	UTC+09
Гуам	GUA	13°35.4' N	144°52.5' E	5°58.8' N	143°03.0' E	UTC+10
Паратунка	PET	52°58.3' N	158°15.0' E	46°19.8' N	136°52.2' E	UTC+12

тельные искусственные и техногенные эффекты. Результаты анализа сравнивались с данными межпланетного магнитного поля и параметрами солнечного ветра (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>). Для анализа возмущений в авроральной зоне использовались индексы геомагнитной активности AE , AU , AO и AL (<http://isgi.unistra.fr/index.php>). Значения AU - и AL -индексов характеризуют интенсивность восточного (послеполуденный сектор) и западного (утренний сектор) токов полярного электроджета в авроральной области [Davis and Sugiura, 1966]. Мерой полной максимальной амплитуды токов электроджета в восточном и западном направлениях является AE -индекс [Davis and Sugiura, 1966]. Индекс AO определяет смещение средней точки AU и AL от спокойного уровня в определенное время и является приближительной мерой, эквивалентной зональному току, независимо от того, существует ли ток в ионосфере или в магнитосфере [Davis and Sugiura, 1966]. Анализ экваториальной токовой системы основывался на часовых значениях Dst -индекса (<http://isgi.unistra.fr>) [Sugiura, 1964].

3. МЕТОДИКА АНАЛИЗА ДАННЫХ

Анализ данных выполнялся на основе вейвлет-преобразования [Chui, 1992; Daubechies, 1992]. Применялась конструкция непрерывного вейвлет-преобразования данных:

$$(W_{\psi})(b, a) := |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad \psi - \text{вейвлет}, \quad (1)$$

$$f \in L^2(R), \quad a, b \in R, \quad a \neq 0.$$

Известно [Chui, 1992; Mallat, 1999], что вейвлет ψ является функцией-окном и непрерывное вейвлет-преобразование (формула (1)) обеспечивает получение детальной информации о частот-

но-временной структуре анализируемых данных. Частотно-временное окно непрерывного вейвлет-преобразования имеет размеры [Chui, 1992]:

$$[win_t] \times [win_{\omega}] = [b + a\langle t \rangle - 2a\Delta_{\psi}, b + a\langle t \rangle + 2a\Delta_{\psi}] \times \left[\frac{\langle \omega \rangle}{a} - \frac{1}{a} \Delta_{\psi}, \frac{\langle \omega \rangle}{a} + \frac{1}{a} \Delta_{\psi} \right], \quad (2)$$

где win_t – “временное окно”, win_{ω} – “частотное окно”, центр окна $\langle t \rangle = \frac{1}{\|f\|_L^2} \int_{-\infty}^{\infty} t |f(t)|^2 dt$, радиус

окна $\Delta_{\psi} = \frac{1}{\|f\|_L^2} \left[\int_{-\infty}^{\infty} (t - \langle t \rangle)^2 |f(t)|^2 dt \right]^{1/2}$, $\langle \omega \rangle$ и Δ_{ψ} – центр и радиус фурье-образа вейвлета $\hat{\psi}$, соответственно.

Амплитуда вейвлет-коэффициентов $v_{b,a} = |(W_{\psi}f)(b, a)|$, характеризует амплитуду локальной особенности функции f в окрестности точки $t = b$ на масштабе a [Chui, 1992]. Поэтому в анализе временных рядов возрастание величины $v_{b,a}$ свидетельствует о возникновении аномальных изменений (отклонений от характерного хода) в данных в окрестности точки $t = b$. При этом величина окрестности определяется размерами временного окна win_t вейвлета (см. соотн. (2)).

Поскольку в анализе геофизических данных представляет интерес изучение положительных и отрицательных аномальных изменений, в работе выполнялась оценка величин

$$v_{b,a}^{\pm} = (W_{\psi}f)(b, a)^{\pm}. \quad (3)$$

На рисунке 1, в качестве примера, представлены результаты применения операций (1), (3) к минутным данным геомагнитного поля станций YAK и PET в период возникновения слабых суббурь на высоких широтах (29.10.2017 г. в 03:23 UT

и в 09:17 UT (<http://supermag.jhuapl.edu>). По данным Kp -индекса (рис. 1а) геомагнитное поле в анализируемый период было спокойное. Результаты обработки данных показывают, что во время первой суббури (после 03:00 UT) незначительное возрастание геомагнитных возмущений происходило только на среднеширотной станции PЕТ (рис. 1з), а на ст. YAK в этот период наблюдаются колебания такого же спектра (рис. 1в), но не превышающие их фоновый уровень. Во время второй суббури в период с 09:00 до 15:00 UT величина $v_{b,a}$ (рис. 1з) возросла на обеих станциях (на рис. 1в значения величин $v_{b,a}^{\pm}$ показаны цветом). Максимальные значения величины $v_{b,a}$ наблюдались в ночном секторе LT и на ст. PЕТ достигали $v_{b,a} = 1200$, а на ст. YAK были в окрестности $v_{b,a} = 1800$. Анализ вариаций поля (рис. 1б) показывает в этот период наличие аномальных изменений в данных разной амплитуды и длительности, что подтверждает эффективность операций (1), (3) для детектирования подобных особенностей в структуре вариаций геомагнитного поля. Эффективность применения операций (1), (3) также заключается в возможности автоматического обнаружения короткопериодных аномальных изменений в данных геомагнитного поля (без участия эксперта), свидетельствующих о повышении геомагнитной активности. Отметим, несмотря на различный характер вариаций (рис. 1б), анализ результатов (рис. 1в, 1з) показывает наличие четко выраженного общего характера в их динамике – в моменты начала суббури около 09:17 UT (18:17 LT на ст. YAK и 21:17 LT на ст. PЕТ) наблюдается синхронное возникновение возмущений на станциях, преимущественно, общего спектра в диапазоне от 8×10^{-3} Гц и выше (масштабы на рис. 1в переведены в псевдочастоты). Ближе к полудню LT интенсивность возмущений $v_{b,a}^{\pm}$ спадает, а в послеполуденном секторе снова резко возрастает (рис. 1з). Наибольшие значения интенсивности $v_{b,a}^{\pm}$ сначала наблюдаются на ст. YAK (около 23:00 LT), а затем через 40–50 мин – на ст. PЕТ (около 02:45 LT). Результаты обработки указывают на общую природу выделенных возмущений и их связь с проявлением токовой системы полярных широт.

Учитывая нестационарность анализируемых данных, для выделения короткопериодных аномалий предложено использовать адаптивные пороги:

$$F_{T_a} [(W_{\psi}f)(b,a)] = \begin{cases} (W_{\psi}f)(b,a), & \text{если } (W_{\psi}f)(b,a) \geq T_a \\ 0, & \text{если } |(W_{\psi}f)(b,a)| < T_a \\ -(W_{\psi}f)(b,a), & \text{если } (W_{\psi}f)(b,a) \leq -T_a, \end{cases} \quad (4)$$

где порог $T_a = U\sigma_a$, $\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{l-1} \sum_{k=1}^l ((W_{\psi}f)(b,a) - \overline{(W_{\psi}f)(b,a)})^2}$, $\overline{(W_{\psi}f)(b,a)}$ – среднее значение вейвлет-коэффициентов, U – пороговый коэффициент, определяет величину выделяемой аномалии. Длина скользящего временного окна l определяет размеры окна, в рамках которого оцениваем аномалию.

Интенсивность короткопериодных аномалий в момент времени $t = b$ можно оценить на основе величины:

$$E_b = \sum_a F_{T_a} [(W_{\psi}f)(b,a)], \quad (5)$$

или интенсивность короткопериодных положительных и отрицательных аномалий в момент времени $t = b$:

$$E_b^{\pm} = \sum_a F_{T_a} [(W_{\psi}f)(b,a)^{\pm}]. \quad (6)$$

На рисунке 2 представлены результаты применения операций (4), (6) к минутным данным сети магнитных станций в период спокойного геомагнитного поля (<http://spaceweather.com>). При выполнении операции (4) использовался пороговый коэффициент $U = 2$, который позволяет выделить отклонения вариаций от характерного уровня от 2 СКО и более. Обработка выполнялась в скользящем временном окне длины $l = 720$ отсчетов, что соответствует 12 ч. Анализ параметров межпланетной среды (рис. 2а) показывает, что амплитуда флуктуаций Bz -компоненты ММП не превышала ± 4 нТл. Результаты обработки данных меридионально расположенных станций YAK, PЕТ и GUA (рис. 2в, 2г) показывают 31.10.2017 г. в период с 09:00 по 15:00 UT (всемирное время указано в верхней части рис. 2) синхронное возникновение короткопериодных геомагнитных возмущений разной интенсивности – наблюдаются кратковременные возрастания величины E_b^{\pm} , которая на всех станциях не выходила за пределы $E_b^{\pm} = \pm 1000$ (рис. 2г). Станции находились в этот период в вечернем и полуденном секторах LT. По данным авроральной зоны (рис. 2д, 2е) в этот период наблюдаются возрастания геомагнитной активности на станциях BRW, СМО, YKC и FCC, которые находились в вечернем и утреннем секторах LT. На станциях вечернего сектора BRW и СМО возмущения имели наибольшую интенсивность и резкий спектр (рис. 2д, 2е), а на станциях утреннего сектора YKC и FCC наблюдались преимущественно бухтообразные возмущения меньшей интенсивности. Сопоставление с данными ММП (рис. 2а) показывает, что момент возникновения возмущений как на меридиональных, так и на авроральных станциях совпадает с резким поворотом на юг Bz -компоненты и возраста-

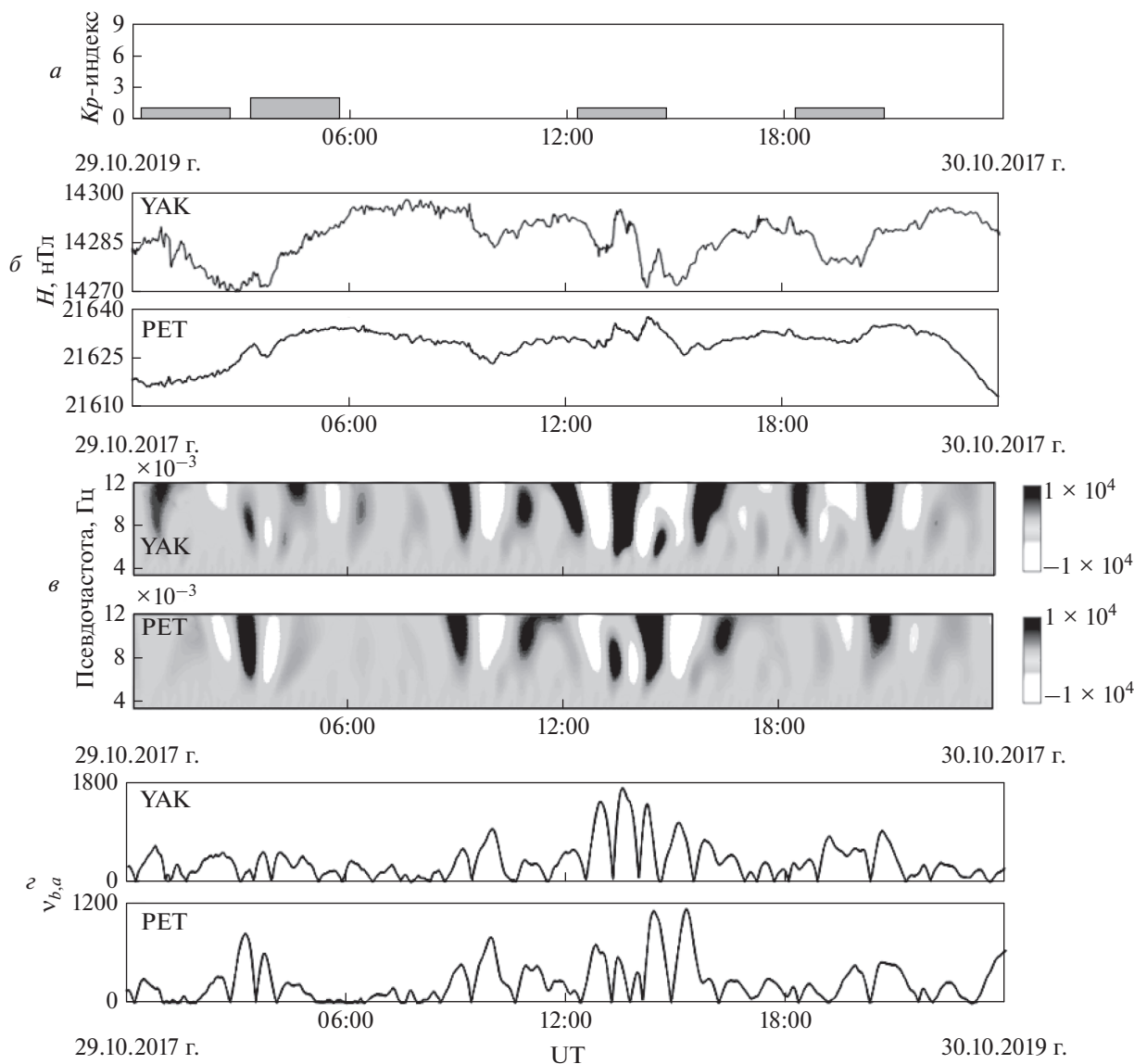


Рис. 1. Результаты обработки геомагнитных данных за период с 29.10.2017–31.10.2017 гг.: (а) – K_p -индекс; (б) – H -компоненты геомагнитного поля; (в) – применение операции (1); (г) – результат оценки величины $v_{b,a}$.

нием ее величины. Затухание возмущений произошло одновременно с поворотом B_z -компоненты на север. Также заметим, что уменьшение величины интенсивности возмущений E_b^\pm на меридиональных станциях было в направлении к низким широтам, и на ст. GUA изменения в вариациях поля практически неразличимы в фоне (рис. 2г). Анализ результатов свидетельствует о внешней природе выделенных возмущений и согласуется с результатами работ [Akasofu and Leping, 1977; Kane, 1977; Tsurutani et al., 1988]. Отметим, что по данным обработки внезапные короткопериодные слабые повышения геомагнитной активности также наблюдались в начале суток 31.10.2017 г. на ст. средних широт PET (отрица-

тельные возмущения) и на приэкваториальной ст. GUA (положительные возмущения) (рис. 2в, 2г). Станции находились в дневном секторе LT. Сопоставление моментов возникновения возмущений с данными авроральной зоны (рис. 2д, 2е) показывает их связь с проявлением токовой системы полярных широт – наблюдаются короткопериодные возмущения сложного спектра в вечернем и ночном секторах на станциях АВК, LRV и NAQ (западная электроструя, рис. 2е). Отметим, что возмущения происходили в период длительного поворота на юг B_z -компоненты ММП (рис. 2а). Результаты подтверждают возможность применения методики для детектирования внезапных малоамплитудных изменений в данных геомагнитного поля. Отметим, что на основе ана-

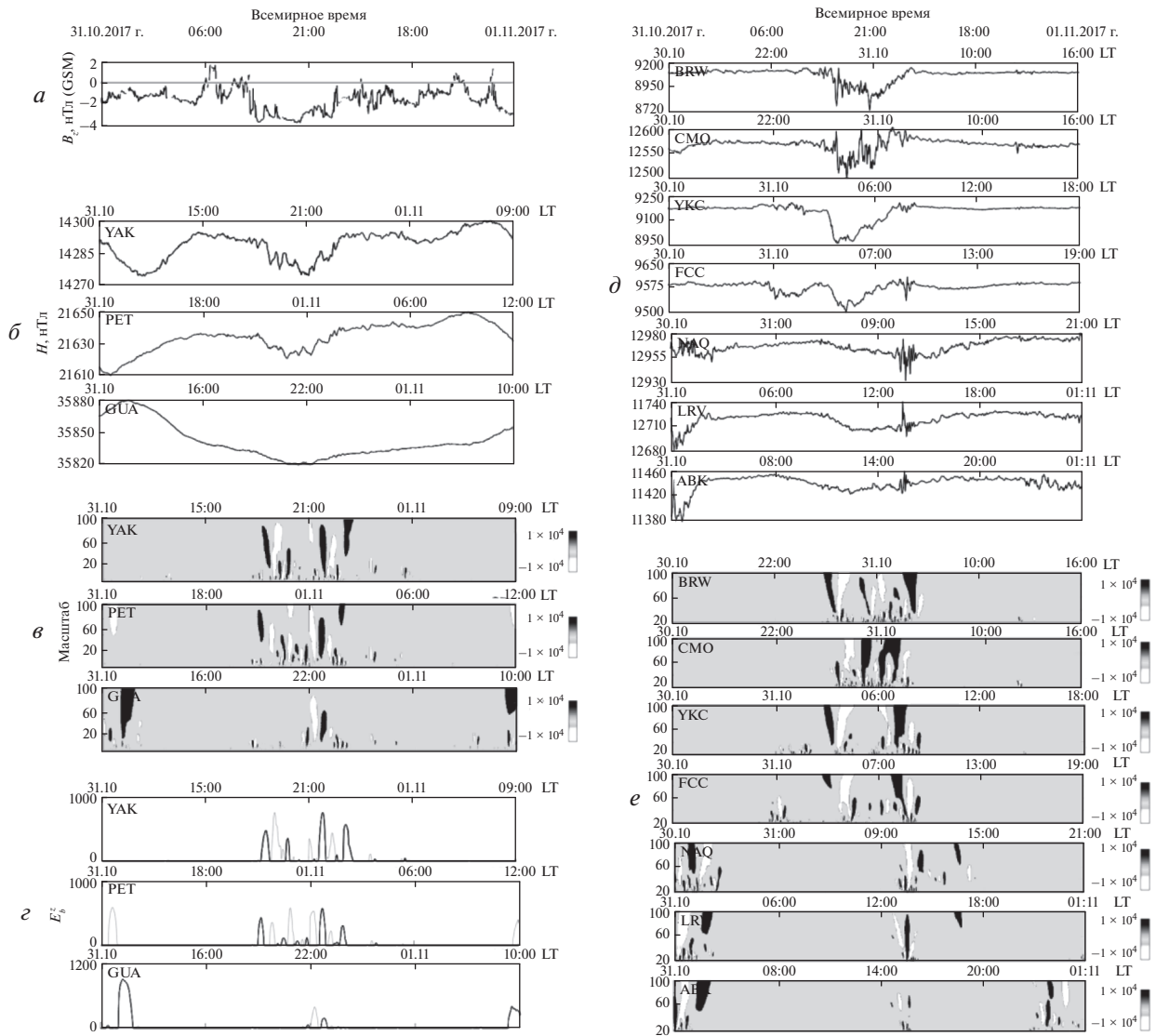


Рис. 2. Результаты обработки геомагнитных данных за период с 30.10.2017–01.11.2017 гг.: (а) – B_z -компонента ММП; (б) – H -компоненты геомагнитного поля станций YAK, PET и GUA; (в) – положительные (черным) и отрицательные (белым) возмущения на станциях YAK, PET и GUA (операция (4), размер скользящего временного окна равен 720 отсчетов); (г) – положительные (черным) и отрицательные (белым) возмущения на станциях YAK, PET и GUA (операция (5)); (д) – H -компоненты геомагнитного поля станций авроральной зоны; (е) – положительные (черным) и отрицательные (белым) возмущения на станциях авроральной зоны (операция (4), размер скользящего временного окна равен 720 отсчетов).

лиза исходных вариаций (рис. 2б, 2д) выделить слабые возмущения поля весьма затруднительно, что свидетельствует о высокой детектирующей способности вейвлетов и эффективности предлагаемой методики. Анализ результатов и их сопоставление с данными околоземного пространства свидетельствует о значимом влиянии параметров межпланетной среды на состояние геомагнитного поля в спокойный период, а также показывает возможность их распространения от высоких до низких широт.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ И ОБСУЖДЕНИЯ

Первое анализируемое событие, произошедшее 27 сентября 2017 г. (рис. 3 и рис. 4) вызвано высокоскоростным потоком, вытекающим из обширной корональной дыры (<http://spaceweather.com>). Накануне магнитной бури скорость солнечного ветра составила 345 км/с, флуктуации B_z -компоненты ММП находились в пределах ± 2 нТл. Анализ данных показывает, что 26 сентября в периоды поворота B_z -компоненты ММП на юг (рис. 3б) наблюдались слабые возрастания

индексов авроральной активности (рис. 3а) и кратковременные повышения геомагнитной активности на меридиональных станциях (рис. 3д). По данным авроральной зоны (рис. 4) с 03:00 UT на станциях ночного сектора YKC, FCC и SNK возникли слабые геомагнитные возмущения с четко выраженным общим спектром (рис. 4б), наибольшая интенсивность которых на станции FCC указывает на близость области образования. Результаты обработки данных нейтронных мониторов (рис. 5в, 5з) показывают в этот период плавное повышение интенсивности КЛ на высокоширотных станциях Туле и Инувик. Заметим, что моменты возникновения кратковременных геомагнитных возмущений на меридиональных станциях (рис. 5а) совпадают с моментами изменения динамики КЛ (рис. 5в, 5з). Аномальное повышение интенсивности КЛ достигло пика во второй половине суток 26 сентября – величина E_b^+ на ст. Туле достигла значения 2.1×10^6 около 14:00 UT (рис. 5з), а на ст. Инувик достигла значения 4×10^6 около 19:00 UT (рис. 5в). Детальный анализ данных нейтронных мониторов (рис. 6б–6ж, при выполнении операции (4) использовались пороги $2\sigma_a$ и $2.5\sigma_a$) подтверждает внешнюю природу выделенных геомагнитных возмущений – с начала суток 26 сентября наблюдается длительное плавное повышение интенсивности КЛ, превысившее фоновый уровень вариаций на ст. Туле около 13:00 UT и на ст. Инувик около 16:00 UT. Отметим, что отсутствие возмущений в околоземном пространстве 25 сентября (накануне бури) обеспечивает получение результатов с наименьшей погрешностью при обработке данных в скользящем временном окне (использовалось суточное временное окно – $l = 1440$ отсчетов). Также заметим, что применение порога $2.5\sigma_a$ позволяет понизить влияние шума в данных нейтронных мониторов и более четко детектировать аномальные изменения в вариациях космических лучей (рис. 6в, 6е).

В начале суток 27 сентября в момент резкого поворота на юг B_z -компоненты ММП (рис. 3б) наблюдается возникновение синхронных слабых геомагнитных возмущений на меридиональных станциях (рис. 3д, 3е и рис. 5а, 5б), а также на станциях ночного сектора авроральной зоны AVK, LRV, и NAQ (рис. 4б). Отметим, что внезапные малоамплитудные (практически неразличимые в фоне) короткопериодные изменения в вариациях геомагнитного поля возникли около 00:00 UT на всех станциях авроральной зоны, ночного и дневного секторов LT. Станции YAK, PET и GUA в этот период находились в дневном секторе, и, как показывают результаты (рис. 3е), выделенные короткопериодные возмущения наибольшую амплитуду имели на приэкваториальной ст. GUA. Аналогичный характер возник-

новения слабых внезапных короткопериодных геомагнитных возмущений отмечен в работе [Mandrikova et al., 2018] накануне сильных магнитных бурь 7 января и 17 марта 2015 г. Мы считаем, что выделенный эффект связан с началом образования области сжатия, на что также указывают результаты обработки данных КЛ – в начале суток 27 сентября на анализируемых станциях наблюдается возникновение Форбуш-понижения, которое более выражено на ст. Туле (амплитуда превысила фоновый уровень около 04:00 UT, рис. 6е, 6ж). За 4 ч 30 мин до начала бури интенсивность выделенных геомагнитных короткопериодных возмущений (величина E_b^{\pm} , рис. 5б) превысила фоновый уровень более чем в 2.5 раза, по сравнению со спокойным периодом (значения величины E_b^{\pm} в спокойный период показаны на рис. 2з). Смещение и постепенное уменьшение возмущений происходило в авроральной области в западном направлении (западный электроджет (рис. 4б), координаты станций указаны в табл. 1). Около 02:00 UT по данным вариаций геомагнитного поля (рис. 4а) вблизи ст. SNK наблюдается разрыв Харанга. Анализ результатов указывают на связь выделенных геомагнитных возмущений с изменениями параметров межпланетной среды, которые при дальнейшем развитии вызвали магнитную бурю. Выделенные эффекты согласуются с результатами исследований, представленных в работах [Mandrikova et al., 2014; Mandrikova et al., 2018], и подтверждают возможность возникновения кратковременных предбуревых слабых повышений в геомагнитном поле на фоне малых флуктуаций B_z -компоненты ММП и аномальных изменений в динамике КЛ.

Начальная фаза бури сопровождалась сильным повышением геомагнитной активности на станциях средних и высоких широт (YAK, PET), и одновременным сильным возрастанием авроральной активности. Форбуш-понижение в КЛ по данным ст. Туле (рис. 5з) достигло максимальной амплитуды в период наиболее сильных геомагнитных возмущений и минимума Dst -индекса (около 09:00 UT, рис. 3в). Во время основной фазы бури вариации геомагнитного поля на станциях имели разную структуру (рис. 3з), что, по-видимому, связано с их географическим расположением. Наиболее сильные геомагнитные возмущения сопровождалась повышением авроральной активности (рис. 4б) и происходили в периоды возрастания амплитуды флуктуаций и поворотов на юг B_z -компоненты ММП (рис. 3б). В окрестностях минимумов значений H -компонент (рис. 3з) величины $v_{b,a}$ и E_b^{\pm} существенно возрастали (рис. 3е и рис. 5б), их значения на ст. YAK достигали $v_{b,a} = 24000$ и $E_b^{\pm} = -24000$, а на ст. PET находились в окрестности $v_{b,a} = 14000$ и

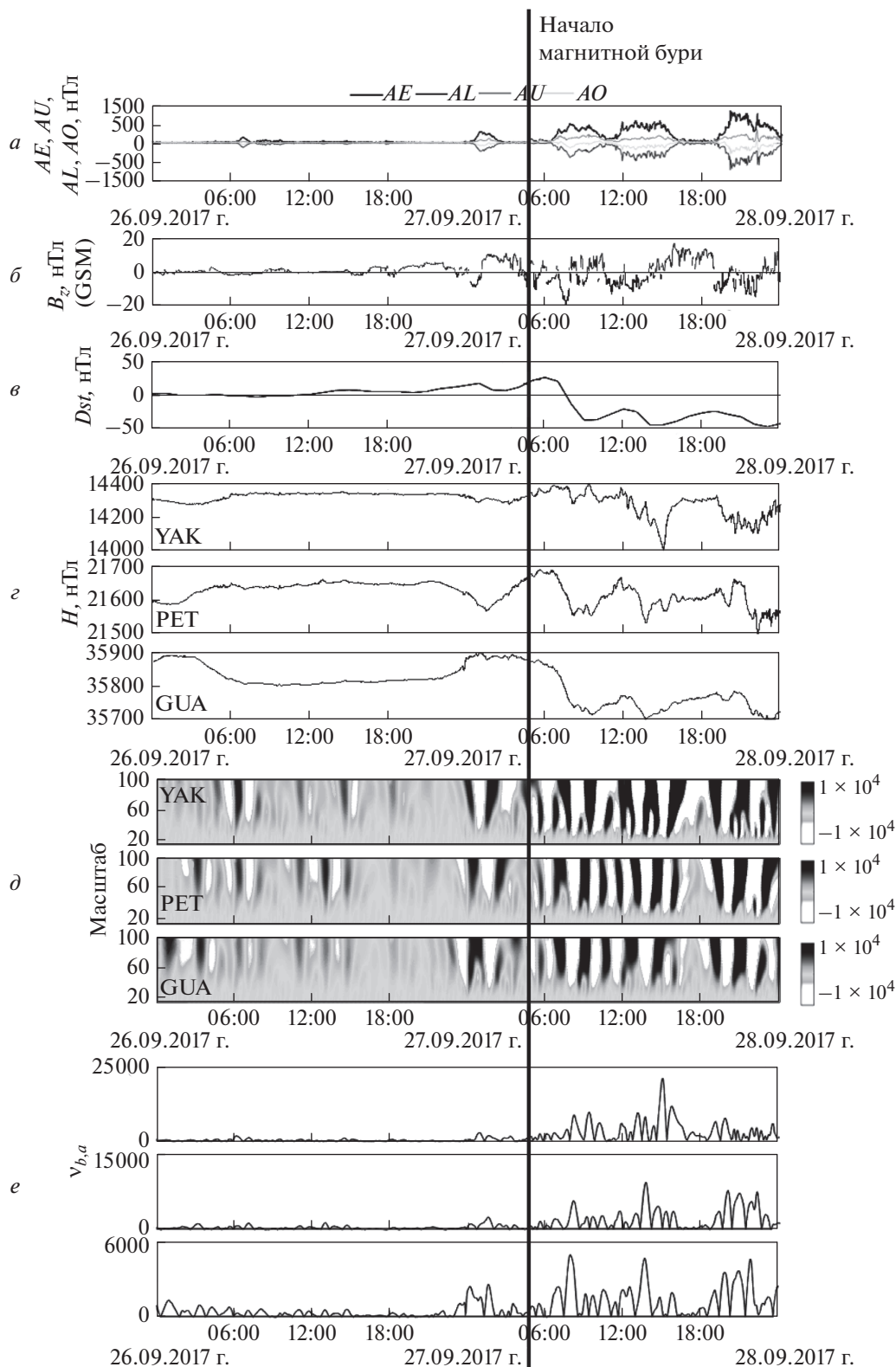


Рис. 3. Результаты обработки данных за период с 26.09.2017–28.09.2017 гг.: (а) – авроральные индексы AE , AO , AL и AU ; (б) – B_z -компонента ММП; (в) – Dst -индекс; (г) – H -компоненты геомагнитного поля станций YAK, PET и GUA; (д) – вейвлет-спектр геомагнитных возмущений в районах станций YAK, PET и GUA (операция (1)); (е) – результат оценки величины $v_{b,a}$.

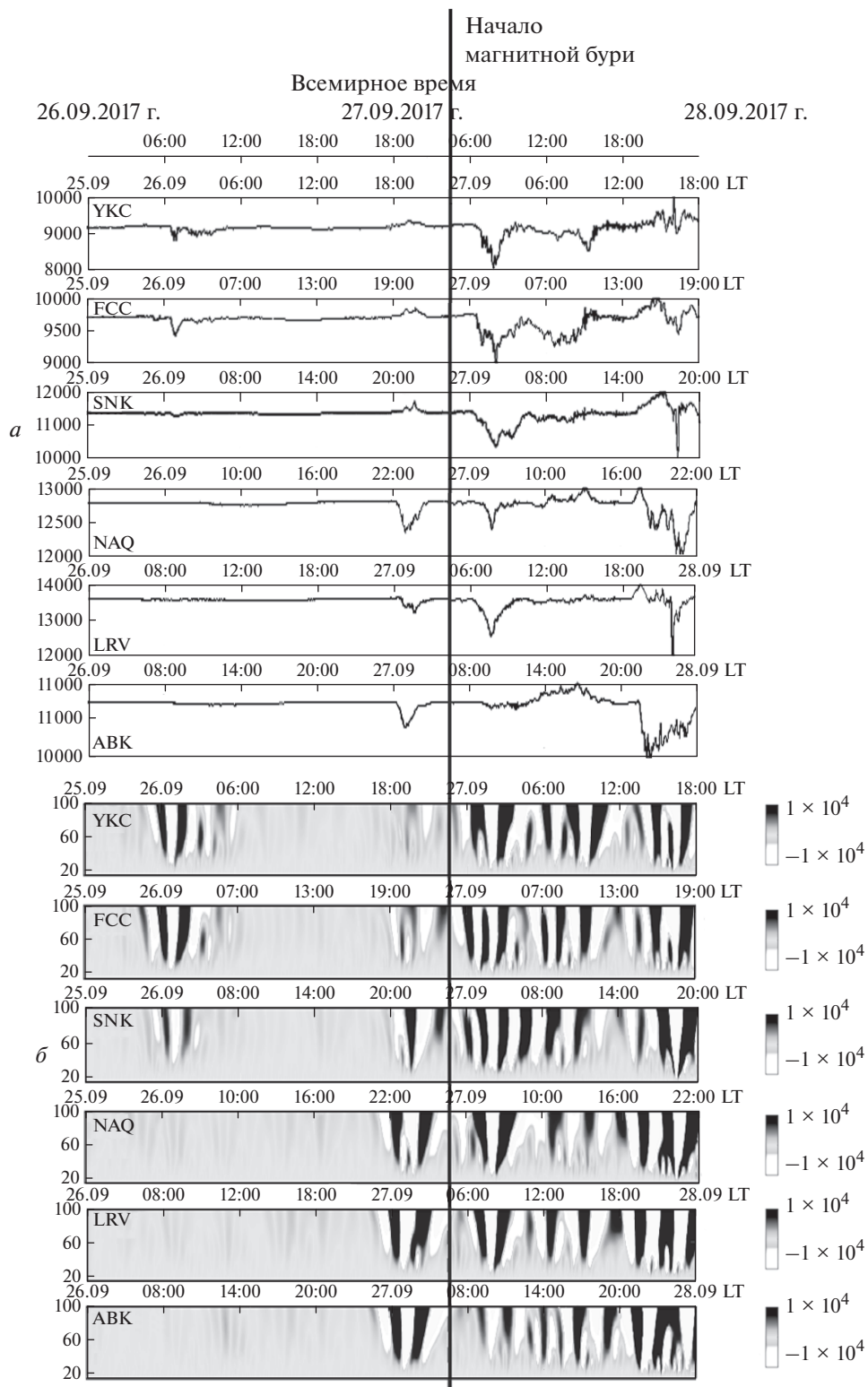


Рис. 4. Результаты обработки данных авроральных станций за период с 26.09.2017–28.09.2017 гг.: (а) – *H*-компоненты геомагнитного поля станций авроральной зоны; (б) – вейвлет-спектр геомагнитных возмущений станций авроральной зоны (операция (1)).

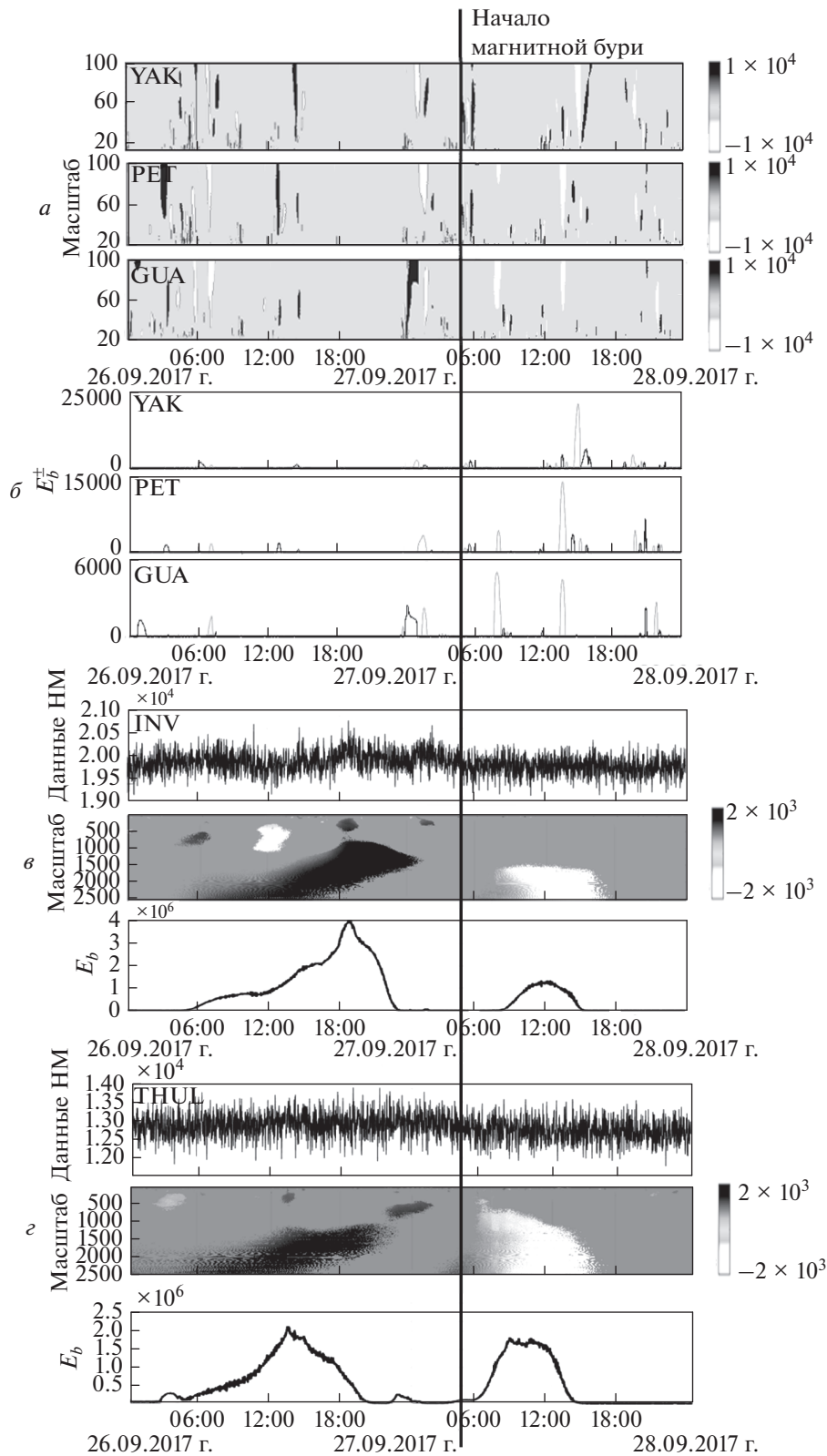


Рис. 5. Результаты обработки данных за период с 26.09.2017–27.09.2017 гг.: (а) – положительные (черным) и отрицательные (белым) возмущения на станциях YAK, PET и GUA (операция (4), размер скользящего временного окна равен 720 отсчетов); (б) – положительные (черным) и отрицательные (белым) возмущения на станциях YAK, PET и GUA (операция (6)); (в) – результат обработки данных нейронного монитора ст. Инувик (США) (операции (4, 5)); (г) – результат обработки данных нейронного монитора ст. Туле (США) (операции (4, 5)).

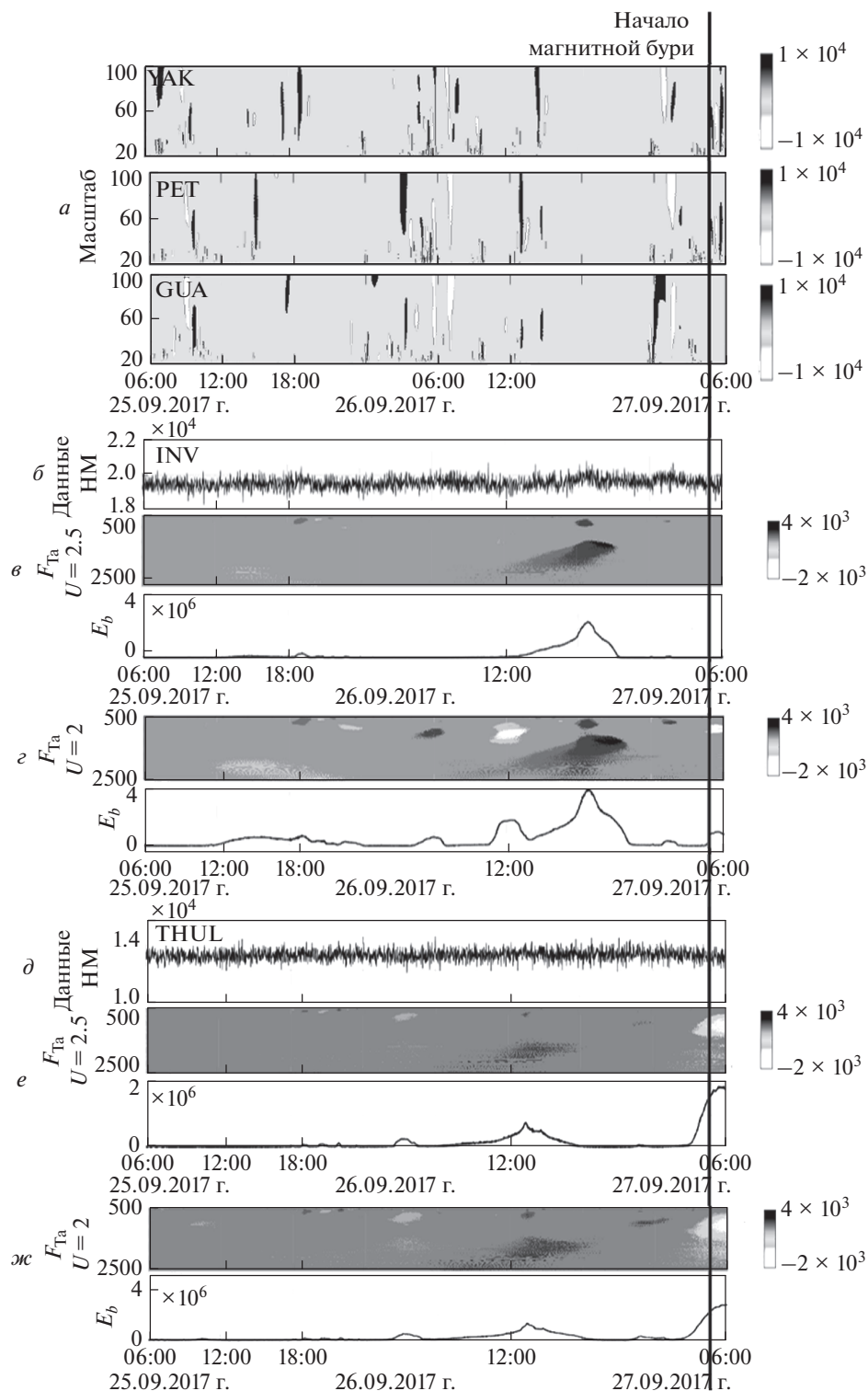


Рис. 6. Результаты обработки данных за период с 26.09.2017–27.09.2017 гг.: (а) – положительные (черным) и отрицательные (белым) возмущения на станциях YAK, PET и GUA (операция (4), размер скользящего временного окна равен 720 отсчетов); (б) – данные НМ ст. Инувик; (в) – применение операций (4) и (5) с величиной порога $2.5\sigma_a$ к данным ст. Инувик; (г) – применение операций (4) и (5) с величиной порога $2\sigma_a$ к данным ст. Инувик; (д) – данные НМ ст. Туле; е – применение операций (4) и (5) с величиной порога $2.5\sigma_a$ к данным ст. Туле; (ж) – применение операций (4) и (5) с величиной порога $2\sigma_a$ к данным ст. Туле.

$E_b^\pm = -14000$. Отметим, что в анализируемый выше спокойный период величина $v_{b,a}$ на ст. YAK не превышала значения $v_{b,a} = 1800$, а на ст. PET не превышала $v_{b,a} = 1200$ (см. рис. 1з). Величины E_b^\pm на данных станциях не выходили за пределы $E_b^\pm = \pm 1200$ (рис. 2з). Несмотря на разный характер вариаций геомагнитного поля, следует отметить наличие четко выраженного общего спектра возмущений на меридиональных станциях (рис. 3д), что указывает на преобладающее влияние кольцевого тока и подтверждает результаты работ [Rastogi, 2005; Chiaha et al., 2019].

Второе анализируемое событие произошло 9 июля 2017 г. (рис. 7 и рис. 8). Накануне магнитной бури с 5 по 8 июля ССВ находилась в пределах 360–452 км/с (рис. 8а), флуктуации B_z -компоненты ММП были в пределах ± 5 нТл (рис. 7б). Из-за прихода в начале сут 9 июля неоднородного ускоренного потока (плотность частиц достигала 60 протонов/см³, (<http://ipg.geospace.ru>)) ССВ (рис. 8а) постепенно увеличилась до 640 км/с и до конца периода оставалась на уровне 500–640 км/с, флуктуации B_z -компоненты ММП усилились до ± 10 нТл (рис. 7б). Постепенное начало слабой магнитной бури зарегистрировано 9 июля в 02:00 на ст. Баренцбург и в 01:00 на ст. Мурманск (<http://ipg.geospace.ru>).

Результаты обработки данных КЛ ст. Инувик (рис. 8е) показывают накануне события около 08:00 UT 8 июля плавное повышение интенсивности КЛ и одновременно на всех меридиональных станциях YAK, PET и GUA наблюдается четко выраженное синхронное возникновение короткопериодных геомагнитных возмущений одинакового спектра (рис. 8б). Станции находились в этот период в вечернем секторе LT. По данным ММП (рис. 7б) в эти моменты происходили кратковременные повороты на юг B_z -компоненты, но ее флуктуации не превышали ± 3 нТл. Результаты обработки геомагнитных данных авроральной зоны показывают слабые (не превышающие фоновый уровень) кратковременные изменения на находящихся в полуденном секторе станциях СМО и BRW (рис. 7д). Сопоставление выделенных возмущений с данными вариаций КЛ и с данными ММП указывает на их внешнюю природу.

Далее после 18:00 UT 8 июля по данным ст. Инувик аномальное повышение в КЛ превысило фоновый уровень и в 21:00 UT интенсивность аномалии достигла значения $E_b = 14 \times 10^5$ (рис. 8е), на всех магнитных станциях в этот период наблюдаются слабые кратковременные возрастания геомагнитной активности (рис. 8б). В моменты наибольшей интенсивности КЛ наблюдается возникновение кратковременных слабых (практически неразличимых в шуме) син-

хронных повышений геомагнитной активности на находящихся в вечернем секторе авроральных станциях FCC и YKC и на ст. YAK (рис. 7д). Отметим, что выделенные слабые кратковременные геомагнитные возмущения на станциях меридионального расположения наибольшую амплитуду имели на приэкваториальной ст. GUA (рис. 8б). Полученные результаты, аналогично событию выше, подтверждают возможность возникновения предбуревых слабых повышений в геомагнитном поле на фоне аномальных изменений в динамике КЛ и свидетельствуют об эффективности предлагаемой методики для их обнаружения.

В утренние часы 09 июля около 00:10 UT, когда B_z -компонента ММП повернулась на юг и достигла значения -10 нТл (рис. 7б), на всех меридиональных станциях наблюдается возрастание геомагнитной активности (рис. 7д) и рост авроральных индексов (рис. 7а). С приходом высокоскоростного потока ССВ постепенно возрастала от 350 км/с до 420 км/с, флуктуации B_z -компоненты ММП усилились до ± 12 нТл. Во время максимумов отрицательных значений B_z -компоненты (рис. 7б) авроральная активность существенно возросла (рис. 7а) и возникли сильные возмущения на анализируемых магнитных станциях (рис. 7д). Отметим, что в периоды сильных геомагнитных возмущений с 03:00 до 05:30 UT и с 07:00 до 13:00 UT наблюдаются резкие колебания интенсивности КЛ на ст. Туле (короткопериодное повышение и понижение, рис. 8з), свидетельствующие об изменениях в межпланетной среде. Выделенные пики в интенсивности КЛ четко совпадают с моментами резкого поворота на юг B_z -компоненты ММП (рис. 7б). Второй пик в космических лучах, связанный с началом Форбуш-понижения (рис. 8з), совпадает с моментом возникновения синхронных геомагнитных возмущений на меридиональных станциях YAK и PET (рис. 8б) и началом суббури на авроральных широтах (рис. 7а, 7д), которая на станциях полуденного сектора имела наибольшую интенсивность. Аналогично рассмотренному выше событию на всех станциях четко прослеживается общий характер спектральной структуры геомагнитных возмущений (рис. 7д), указывающий на преобладающее влияние кольцевого тока. Наиболее сильные возмущения сопровождалось повышением авроральной активности и происходили в периоды возрастания амплитуды флуктуаций и поворотов на юг B_z -компоненты ММП.

Проведенный анализ свидетельствует о сложной динамике геомагнитных возмущений в периоды повышенной солнечной активности и магнитных бурь, исследование которой требует развития методов анализа данных и широкой сети наблюдений. Анализируемые слабые магнитные бури имели постепенное начало, наиболее сильные геомагнитные возмущения наблюдались в

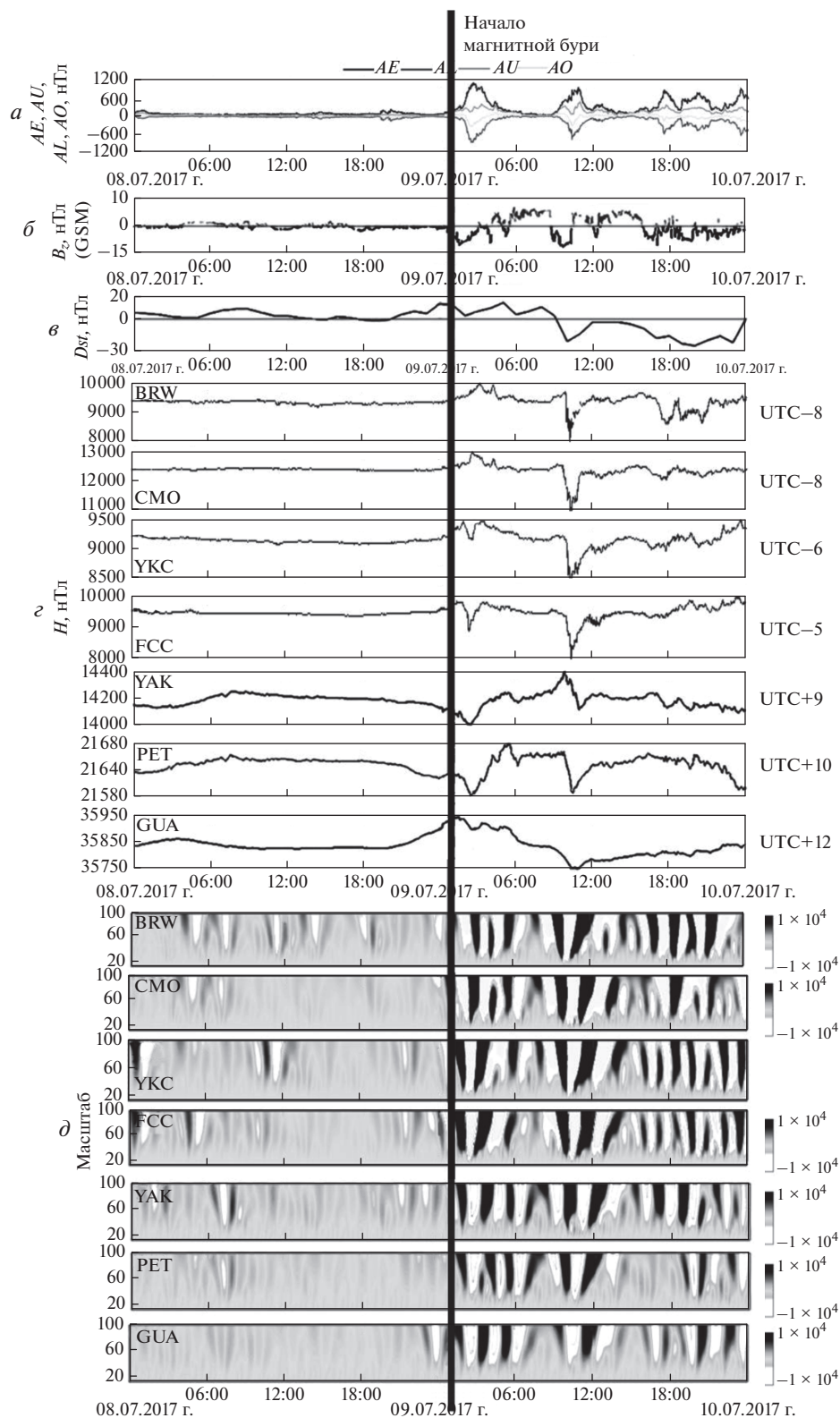


Рис. 7. Результаты обработки данных за период с 08.07.2017–10.07.2017 гг.: (а) – авроральные индексы AE , AO , AL и AU ; (б) – B_z -компонента ММП; (в) – Dst -индекс; (г) – H -компоненты геомагнитного поля станций BRW, CMO, YKC, FCC, YAK, PET и GUA; (д) – вейвлет-спектр геомагнитных возмущений в районах станций BRW, CMO, YKC, FCC, YAK, PET и GUA (операция (1)).

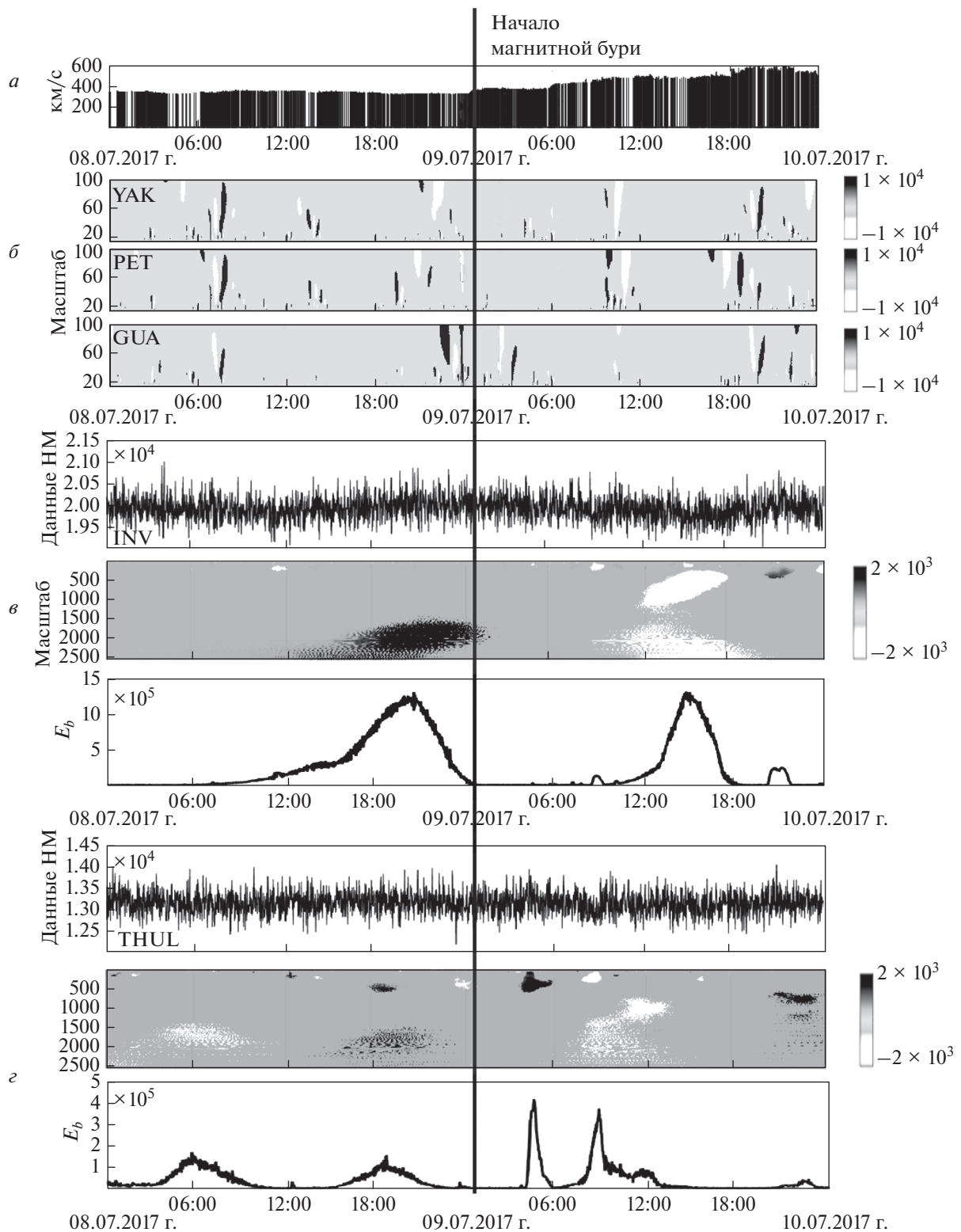


Рис. 8. Результаты обработки данных за период с 08.07.2017–10.07.2017 гг.: (а) – скорость солнечного ветра; (б) – положительные (черным) и отрицательные (белым) возмущения на станциях YAK, PET и GUA (операция (4), размер скользящего временного окна равен 720 отсчетов); (в) – результат обработки данных нейронного монитора ст. Инувик (США) (операции (4) и (5)); (г) – результат обработки данных нейронного монитора ст. Туле (США) (операции (4) и (5)).

периоды возрастания амплитуды флуктуаций и поворотов на юг B_z -компоненты ММП и сопровождалась существенным повышением авроральной активности. Во время событий на всех меридиональных станциях четко прослеживалась общая спектральная структура геомагнитных возмущений, что указывает на преобладающее влияние кольцевого тока и согласуется с результатами работ [Rastogi, 2005; Chiaha et al., 2019]. Применение методики показало, что в окрестностях минимумов значений H -компонент интенсивность геомагнитных возмущений ($v_{b,a}$ и E_b^{\pm}) возрастала более чем в 10 раз, по сравнению с периодами спокойного геомагнитного поля. В динамике космических лучей в эти периоды выделены аномальные изменения, характеризующие возникновение Форбуш-эффектов малой амплитуды.

Результаты исследования подтвердили возможность возникновения кратковременных слабых возрастаний геомагнитной активности, предшествующих началу магнитных бурь. Слабые возрастания геомагнитной активности накануне магнитных бурь отмечены в ряде работ [Hafez et al., 2012; Sheiner, Fridman, 2012; Mandrikova et al., 2014, 2018, 2019; Soloviev et al., 2016], но их интерпретация является сложной задачей. Применение методики позволило четко детектировать и оценить короткопериодные геомагнитные возмущения, наблюдаемые на фоне поворотов на юг B_z -компоненты ММП, слабых повышений интенсивности космических лучей и возрастаний авроральной активности. Выделенные аномалии в космических лучах характеризовались плавным повышением интенсивности, достигающей максимальной величины за несколько часов до начала магнитных бурь. Синхронное возникновение геомагнитных возмущений и наблюдаемая корреляция с изменениями параметров межпланетной среды указывает на их внешнюю природу и связь с приближающейся магнитной бурей.

5. ВЫВОДЫ

На основе новой методики выполнен детальный пространственно-временной анализ динамики геомагнитных возмущений в периоды слабых магнитных бурь 9 июля и 27 сентября 2017 г. В качестве дополнительного фактора оценки состояния околоземного космического пространства использовались данные космических лучей.

Результаты работы подтвердили эффективность разработанной методики для обнаружения аномальных изменений в геомагнитных данных разной интенсивности и продолжительности. На примере рассмотренных событий показана возможность применения методики для обнаружения слабых (малоамплитудных) геомагнитных

возмущений в периоды спокойного и слабозвозмущенного геомагнитного поля.

Применение методики к данным нейтронных мониторов показало возможность ее использования для обнаружения Форбуш-эффектов в вариациях космических лучей. Экспериментально доказана эффективность методики для обнаружения Форбуш-эффектов малой амплитуды, которые могут предшествовать началу магнитных бурь и служить их предикторами.

Численная реализация методики обеспечит возможность ее применения в оперативном анализе в задачах прогноза космической погоды, что определяет важную прикладную значимость исследования.

Авторы планируют продолжить исследование в данном направлении с расширением статистического материала и с последующим уточнением параметров используемых вычислительных решений с целью повышения эффективности методики. На следующем этапе работы планируется выполнить анализ сильных и умеренных магнитных бурь с резким и постепенным началом для выявления особенностей возникновения и распространения геомагнитных возмущений в эти периоды.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность институтам, выполняющим поддержку станций нейтронных мониторов (<http://cosray.unibe.ch/>), (<http://spaceweather.izmiran.ru/rus/fds2015.html>), наземных магнитометров (www.intermagnet.org) и данных межпланетного магнитного поля и солнечного ветра (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>), которые использовались в работе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках Государственного задания по теме “Физические процессы в системе ближнего космоса и геосфер при солнечных и литосферных воздействиях” (2021–2023 г.) № гос. регистрации АААА-А21-121011290003-0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абуни А.А., Абунина М.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Форбуш-эффекты с внезапным и постепенным началом // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 52. № 3. С. 313–320. 2012.
- Анисимов С.В., Шихова Н.М., Клейменова Н.Г. Среднширотные геомагнитные пульсации Pc1: результаты наблюдений и статистические оценки // Физика Земли. № 5. С. 27–37. 2018.
- Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук. Т. 166. № 11. С. 1145–1170. 1996.

- Кузнецов В.Д. Космическая погода и риски космической деятельности // Космич. техника и технологии. № 3(6). С. 3–13. 2014.
- Дэспирак И.В., Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Громов С.В., Мальшева Л.М. Суперсуббури во время бурь 7–8 сентября 2017 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 3. С. 308–317. 2020.
- Зайцев А.Н., Далин П.А., Застенкер Г.Н. Резкие вариации потока ионов солнечного ветра и их отклик в возмущениях магнитного поля земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 6. С. 752–759. 2002.
- Зелинский Н.Р., Клейменова Н.Г., Громова Л.И. Применение нового метода частотно-временных преобразований для анализа характеристик геомагнитных пульсаций $Pc 5$ // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 57. № 5. С. 602–608. 2017.
- Клейменова Н.Г. Влияние космической погоды на человека // Земля и Вселенная. № 6. С. 74–82. 2013.
- Богоутдинов Ш.Р., Агаян С.М., Гвишиани А.Д., Граева Е.М., Родкин М.В., Злотники Ж., Ле Муэль Ж.Л. Алгоритмы нечеткой логики в анализе электротеллурических данных в связи с мониторингом вулканической активности // Физика Земли. № 7. С. 72–85. 2007.
- Лазутин Л.Л. Мировые и полярные магнитные бури. М.: НИИЯФ МГУ, 216 с. 2012.
- Мандрикова О.В., Богданов В.В., Соловьев И.С. Вейвлет-анализ данных магнитного поля Земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. № 2. С. 282–288. 2013. <https://doi.org/10.7868/S0016794013020107>
- Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А. и др. Основные свойства Форбуш-эффектов, связанных с высокоскоростными потоками из корональных дыр // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 2. С. 163–176. 2018а.
- Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А. и др. Долгопериодные изменения количества и величины форбуш-эффектов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 5. С. 638–647. 2018б.
- Старков Г.В. Планетарная динамика аврорального свечения. Физика околоземного космического пространства. Т. 1. Апатиты: Изд-во Кольск. науч. центра РАН, 706 с. 2000.
- Топтыгин И.Н. Космические лучи в межпланетных магнитных полях. М.: Наука, 304 с. 1983.
- Akasofu S.-I., Lepping R.P. Interplanetary magnetic field and magnetospheric substorms // Planet. Space Sci. V. 25. № 10. P. 895–897. 1977.
- Bailey R.L., Leonhardt R. Automated detection of geomagnetic storms with heightened risk of GIC // Earth, Planets and Space. V. 68. 99(2016). 2016. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0477-2>
- Chiaha S.O., Ugonabo O.J., Okpala K.C. A study on the effects of solar wind and interplanetary magnetic field on geomagnetic H -component during geomagnetic storms // Intern. J. Physi. Sci. V. 13. № 15. P. 230–234. 2019.
- Chui C.K. An introduction to wavelets. N.Y.: Academic Press, N.Y., 264 p. 1992.
- Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets. CBMS-NSF Lecture Notes, 377 p. 1992.
- Davis T., Sugiura M. Auroral Electrojet Activity Index AE and Its Universal Time Variations // J. Geophys. Res. V. 71. № 3. P. 785–801. 1966.
- Hafez A.G., Ghamry E., Yayama H., Yumoto K. Wavelet Spectral Analysis Technique for Automatic Detection of Geomagnetic Sudden Commencements // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing. V. 50. № 11. P. 4503–4512. 2012.
- Jach A., Kokoszka P., Sojka, J., Zhu L. Wavelet-based index of magnetic storm activity // J. Geophys. Res. V. 111. A09215. 2006. <https://doi.org/10.1029/2006JA011635>
- Kane R.P. A comparative study of geomagnetic, interplanetary, and cosmic ray storms // J. Geophys. Res. V. 82. № 4. P. 561–577. 1977.
- Livada M., Mavromichalaki H., Plainaki C. Galactic cosmic ray spectral index: the case of Forbush decreases of March 2012 // Astrophys Space Sci. V. 363. P. 8(2018). 2018. <https://doi.org/10.1007/s10509-017-3230-9>
- Mallat S. A Wavelet tour of signal processing. Academic Press, 832 p. 1999.
- Mandrikova O.V., Solovjev I.S., Zalyaev T.L. Methods of analysis of geomagnetic field variations and cosmic ray data // Earth, Planets and Space. V. 66. P. 148(2014). 2014. <https://doi.org/10.1186/s40623-014-0148-0>
- Mandrikova O.V., Solovjev I.S., Khomutov S.Yu., Geppener V.V., Klionskiy D.M., Bogachev M.I. Multiscale variation model and activity level estimation algorithm of the Earth's magnetic field based on wavelet packets // Ann. Geophys. V. 36. № 5. P. 1207–1215. 2018.
- Mandrikova O., Rodomanskay A., Zaitsev A. Analysis of the geomagnetic disturbances dynamics during periods of increased solar activity and magnetic storms (by measurements of INTERMAGNET station network) // E3S Web of Conf. V. 127. 02003 (2019). 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912702003>
- Ni S.-L., Gu B., Han Z.-Y. Interplanetary coronal mass ejection induced forbush decrease event: a simulation study with one-dimensional stochastic differential method // Acta Physica Sinica. V. 66. 139601. 2017. <https://doi.org/10.7498/aps.66.139601>
- Nose M., Iyemori T., Takeda M., Kamei T., Milling D.K., Orr D., Singer H.J., Worthington E.W., Sumitomo N. Automated detection of Pi 2 pulsations using wavelet analysis: 1. Method and an application for substorm monitoring // Earth Planets Space. V. 50. № 9. P. 773–783. 1998.
- Nose M. Automated detection of Pi 2 pulsations using wavelet analysis: 2. An application for dayside Pi 2 pulsation study // Earth Planets Space. V. 51. № 1. P. 23–32. 1999.
- Rastogi R.G. Magnetic storm effects in H and D components of the geomagnetic field at low and middle latitudes // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 67. № 7. P. 665–675. 2005.
- Sheiner O.A., Fridman V.M. The features of microwave solar radiation observed in the stage of formation and initial propagation of geoeffective coronal mass ejections // Radiophysics and Quantum Electronics. V. 54. № 10. P. 655–666. 2012.
- Soloviev A., Agayan S., Bogoutdinov S. Estimation of geomagnetic activity using measure of anomalousness // Annals geophys. V. 59. G0653. 2016. <https://doi.org/10.4401/ag-7116>
- Sugiura M. Hourly values of equatorial Dst for the IGY // Ann. Int. Geophys. V. 35. P. 7–45. 1964.

- *Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Tang F., Akasofu S., Smith E.* Origin of interplanetary southward magnetic fields response for major magnetic storms near solar maximum (1978–1979) // *J. Geophys. Res.* V. 93. A8. 1988.
<https://doi.org/10.1029/JA093iA08p08519>
- *Vecchio A., Laurenza M., Storini M., Carbone V.* New insights on cosmic ray modulation through a joint use of non-stationary data-processing methods // *Adv. Astron.* V. 2012. id.834247.
<https://doi.org/10.1155/2012/834247>
- *Vipindas V., Gopinath S., Girish T.E.* Periodicity analysis of galactic cosmic rays using Fourier, Hilbert, and higher-order spectral methods // *Astrophys. Space Sci.* V. 361. P. 135(2016). 2016.
<https://doi.org/10.1007/s10509-016-2719-y>
- *Xu A., Zhu L., Sojka J., Kokoszka P., Jach A.* An Assessment Study of the Wavelet-Based Index of Magnetic Storm Activity (WISA) and its Comparison to the Dst Index // *J. Atmos Solar-Terr. Physics.* V. 70. № 11. P. 1579–1588. 2008.