

© 2021 г. В.В. ГЕППЕНЕР, д-р техн. наук (gerpener@mail.ru)
(Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина)),
Б.С. МАНДРИКОВА (555bs5@mail.ru)
(Институт космических исследований и распространения
радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, село Паратунка)

ОБНАРУЖЕНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ АНОМАЛЬНЫХ ЭФФЕКТОВ В СЛОЖНОМ СИГНАЛЕ¹

Предложен метод обнаружения и идентификации аномальных эффектов в сигнале сложной структуры, основанный на нелинейных аппроксимирующих схемах в словаре вейвлет-пакетов. С учетом свойств частотно-временного окна вейвлет-преобразования вводится адаптивный порог. Повышение эффективности обнаружения разных типов структур достигается путем применения суперпозиции конструкций вейвлет-преобразования. На примере данных нейтронных мониторов показано, что метод позволяет подавить шум и идентифицировать аномальные эффекты разной формы и длительности. Результаты подтвердили эффективность предлагаемого метода для обнаружения малоамплитудных Форбуш-эффектов в вариациях космических лучей.

Ключевые слова: анализ данных, нелинейная аппроксимация, вейвлет-пакеты, вариации космических лучей.

DOI: 10.31857/S0005231021100056

1. Введение

В настоящее время учеными активно ведутся исследования, связанные с разработкой методов обработки и анализа сложных нелинейных данных [1, 2]. Основная проблема таких исследований заключается в отсутствии априорной информации о полезном сигнале, сложной структуре изучаемых нестационарных данных и наличии высокого уровня шума [3]. Острая необходимость в создании методов анализа сложных данных возникает при проведении ряда фундаментальных и прикладных научных исследований в таких областях, как биомедицина, геофизика, космофизика и т.д.

Космофизические исследования являются одним из ярких примеров необходимости создания математических моделей и методов, способных с приемлемой точностью и, что не менее важно, скоростью выполнять анализ геофизических данных и прогноз космической погоды [4]. Известно, что аномальные события в околоземном космическом пространстве отрицательно,

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме “Физические процессы в системе ближнего космоса и геосфер при солнечных и литосферных воздействиях” (2021–2023 гг.), регистрационный номер АААА-А21-121011290003-0.

а в некоторых случаях губительно отражаются на технических и техногенных объектах, а также на здоровье и жизни людей [5]. Изучение динамики космических лучей занимает широкую область в сфере солнечно-земной физики, а также является одним из факторов мониторинга и прогноза космической погоды. Исследование вариаций космических лучей проводят по данным мировой сети нейтронных мониторов [6]. Вариации космических лучей имеют сложную структуру, в которой находят отражение события, возникающие в атмосфере, галактике, а также имеющие внегалактическое происхождение [7]. Помимо полезной информации, в данных нейтронных мониторов содержится высокий уровень шума, включающий помехи природного и техногенного характера [8]. Периодические вариации космических лучей соответствуют регулярному ходу, аномальные (спорадические) эффекты представляют собой Форбуш-эффекты и сильные наземные протонные возмущения (GLE-события). Форбуш-эффекты могут иметь разную форму и длительность и проявляться в виде резкого снижения уровня, его восстановления, а также мелкомасштабных изменений перед началом магнитных бурь. Особый интерес представляют своевременное обнаружение и идентификация малоамплитудных Форбуш-эффектов, служащих предикторами магнитных бурь [9, 10].

Спектр применяемых в настоящее время методов и подходов к анализу данных космических лучей весьма широк. Например, метод глобальной съемки [9] или метод кольца станций [10], разработанные учеными ИЗМИРАН, позволяют оценить свойства углового распределения космических лучей, но точность методов напрямую зависит от наличия данных определенно расположенных станций, что, к сожалению, не всегда выполнимо. Также данные методы включают сложные трудоемкие расчеты и не автоматизируемы. Известны весьма успешные попытки применения методов машинного обучения для анализа данных нейтронных мониторов [11–13]. Например, в публикациях [11, 12] используются глубокие нейронные сети, позволяющие с учетом мощностей современных ЭВМ в оперативном режиме выполнять анализ данных космических лучей. Но весомым недостатком данных методов является потребность периодической перенастройки параметров системы (например, переобучения нейронной сети) в связи с существенной зависимостью методов от внешних условий. Данный фактор сильно влияет на качество и оперативность получаемых результатов.

Учитывая указанные недостатки, в статье предложен подход, основанный на построении нелинейных адаптивных аппроксимирующих схем. Поскольку распределение вероятности сигнала космических лучей имеет сложную форму, линейная аппроксимация не является эффективной и лучшие результаты дают нелинейные пороговые оценки [14, 15]. В качестве аппроксимирующих функций в статье используются базисы вейвлет-пакетов. Известно, что вейвлет-фильтрация позволяет эффективно детектировать структуры сложного сигнала и подавить шум [11–15]. Разные вейвлет-базисы по-разному аппроксимируют сигнал, поэтому выбор наилучшего базиса, в смысле выделения определенных структур, обеспечивает эффективное решение

поставленной задачи. Но необходимо учитывать, что если сигнал содержит различные типы структур, локализованные в разные моменты времени, то нельзя построить базис, адаптированный ко всем структурам. В этом случае надо использовать большие словари базисов [16], например, как предложено в [15], можно расширить класс ортогональных функций словарями линейно независимых функций. Эффективный результат в этом случае дает аппроксимация с преследованием [17]. Но большая вычислительная сложность данного метода делает его малоэффективным. Алгоритмы согласованного преследования [18] с использованием стратегии “жадности” позволяют оптимизировать процесс построения базиса и получить достаточно точные аппроксимации, но в случае высокого уровня шума такое решение задачи, к сожалению, не дает хороших результатов. В этом случае энергия сигнала мала относительно энергии шума, поэтому такая оценка дает низкий порог и его применение не позволяет подавить весь шум. Поскольку в настоящее время отсутствует строгий математический аппарат построения оценок для сигналов с такими свойствами [15], в статье предлагается метод, основанный на эвристическом подходе. В статье показано, что использование большего порога увеличивает риск, но позволяет получить более точные оценки. С учетом свойств частотно-временного окна вейвлет-преобразования в статье вводится адаптивный порог. Повышение эффективности обнаружения разных типов структур достигается путем применения суперпозиции непрерывного вейвлет-преобразования и нелинейных адаптивных аппроксимаций в словаре вейвлет-пакетов. Представленные результаты подтверждают эффективность предлагаемого метода для задачи обнаружения малоамплитудных Форбуш-эффектов разной формы и длительности в вариациях космических лучей.

2. Предлагаемый метод

2.1. Построение нелинейных аппроксимирующих схем в словаре вейвлет-пакетов

При нелинейной аппроксимации сигнал $f \in H$ (H — пространство Гильберта) аппроксимируется M векторами, адаптивно выбранными из ортонормированного базиса $\mathfrak{B} = \{g_m\}_{m \in N}$ пространства H [15]:

$$(1) \quad f_M = \sum_{m \in I_M} \langle f, g_m \rangle g_m.$$

Тогда погрешность аппроксимации есть

$$\epsilon[M] = \|f - f_M\|^2 = \sum_{m \notin I_M} |\langle f, g_m \rangle|^2.$$

Очевидно, минимизация погрешности $\epsilon[M]$ достигается выбором абсолютных значений вейвлет-коэффициентов $|\langle f, g_{m_k} \rangle|$, наилучшим образом корре-

лирующих с сигналом. Аппроксимация может быть получена путем применения пороговой функции, и соотношение (1) примет вид

$$(2) \quad f_M = \sum_{k=1}^M f_{\mathfrak{B}}^r[k] g_{m_k},$$

где $f_{\mathfrak{B}}^r[k]$ — пороговая функция.

Для оптимизации представления (2) базис \mathfrak{B} выбирают адаптивно сигналы, используя, например, словари вейвлет-пакетов, которые позволяют построить наилучшие аппроксимации сигналов конечной длины путем минимизации вогнутой функции стоимости [15]. В качестве функции стоимости может быть использована вогнутая сумма Шура [19]:

$$C(f, \mathfrak{B}^\lambda) = \sum_{m=1}^N \Phi\left(\frac{|(f, g_m^\lambda)|^2}{\|f\|^2}\right), \quad \Phi(x) = -x \ln x,$$

и наилучший базис \mathfrak{B}^α может быть определен как $C(f, \mathfrak{B}^\alpha) = \min_{\lambda \in \Lambda} C(f, \mathfrak{B}^\lambda)$ (Λ — словари базисов). Каждый узел дерева вейвлет-пакетов соответствует пространству W_j^p , которое определяет ортонормированный базис \mathfrak{B}_j^p . Пространство W_j^p разбивается на ортогональные подпространства [15] $W_j^p = W_{j+1}^{2p} \oplus W_{j+1}^{2p+1}$, и стоимость f в семействе $M \leq N$ определяется как $C(f, \mathfrak{B}) = \sum_{m=0}^{M-1} \Phi\left(\frac{|(f, g_m)|^2}{\|f\|^2}\right)$. Тогда наилучший базис O_j^p пространства W_j^p есть базис [19]:

$$(3) \quad O_j^p = \begin{cases} O_{j+1}^{2p} \cup O_{j+1}^{2p+1}, & \text{если } C(f, O_{j+1}^{2p}) + C(f, O_{j+1}^{2p+1}) < C(f, \mathfrak{B}_j^p), \\ \mathfrak{B}_j^p, & \text{если } C(f, O_{j+1}^{2p}) + C(f, O_{j+1}^{2p+1}) \geq C(f, \mathfrak{B}_j^p). \end{cases}$$

Рекурсивное вычисление лучших базисов (3) при движении снизу вверх по дереву позволяет найти наилучший базис вейвлет-пакетов для сигнала f .

Поскольку не знаем распределения вероятности сигнала, задача состоит в оценке $f \in \Theta$ по зашумленным данным: $X[m] = f[m] + W[m]$, где $X[m]$ — регистрируемые данные, $f[m]$ — сигнал, $W[m]$ — шум. В этом случае риск оценки $\tilde{F} = DX$ есть $r(D, f) = E\{\|DX - f\|^2\}$ (D — оператор решения, E — математическое ожидание). Цель авторов — минимизировать максимальный риск (минимаксный риск) [15]:

$$r_n(\Theta) = \inf_{D \in O_n} \sup_{f \in \Theta} E\{\|DX - f\|^2\}.$$

Донохо и Джонстон в [20] показали, что диагональные пороговые оценки как в случае белого, так и цветного шума имеют риск, близкий к нижней границе минимаксного риска:

$$(4) \quad \tilde{F} = DX = \sum_{m=0}^{N-1} d_m(X_{\mathfrak{B}}[m]) g_m = \sum_{m=0}^{N-1} a[m] X_{\mathfrak{B}}[m] g_m \quad \text{при } 0 \leq m \leq N,$$

$X_{\mathfrak{B}}[m] = \langle X, g_m \rangle$, $f_{\mathfrak{B}}[m] = \langle f, g_m \rangle$, $W_{\mathfrak{B}}[m] = \langle W, g_m \rangle$, $a[m]$ нелинейный проектор:

$$a[m] = \begin{cases} 1, & \text{если } |f_{\mathfrak{B}}[m]| \geq \sigma, \\ 0, & \text{если } |f_{\mathfrak{B}}[m]| < \sigma. \end{cases}$$

Но необходимо учитывать, что риск (4) может быть связан с погрешностью аппроксимации f в базисе \mathfrak{B} :

$$f_M = \sum_{|f_{\mathfrak{B}}[m]| \geq \sigma} f_{\mathfrak{B}}[m] g_m, \quad \epsilon_n[M] = \|f - f_M\|^2 = \sum_{|f_{\mathfrak{B}}[m]| < \sigma} |f_{\mathfrak{B}}[m]|^2.$$

Риск оценивается как [15]:

$$r_p(f) = \sum_{m=0}^{N-1} \min(|f_{\mathfrak{B}}[m]|^2, \sigma^2) = \epsilon_n[M] + M\sigma^2.$$

Поэтому задача выбора базиса важна и определяет риск получаемой оценки $r_p(f)$. Также необходимо учитывать, что применение диагональных пороговых оценок (4) требует знания дисперсии сигнала, что не всегда реализуемо на практике.

В случае жесткой пороговой обработки

$$d_m(x) = \rho_T(x) = \begin{cases} x, & \text{если } |x| > T, \\ 0, & \text{если } |x| \leq T, \end{cases}$$

для минимизации риска порог T выбирается так, что есть большая вероятность того, что он больше максимального уровня коэффициентов шума $|W_{\mathfrak{B}}[m]|$. В [20] доказано, что порог $T = \sigma\sqrt{2\ln N}$ дает оптимальную диагональную оценку в базисе \mathfrak{B} (см. (4)). Дисперсия шума σ^2 может быть оценена [20]: $\bar{\sigma}^2 = \frac{M_X}{0,6745}$, где M_X — медиана множества $\{|\langle X, \psi_{j,m} \rangle|\}_{0 \leq m < N/2}$, $\psi_{j,m}$ — базис пространства W_j^p .

Таким образом, если используем вейвлет-пакеты и выбираем порог T выше максимальной амплитуды коэффициентов шума $|\langle W, \psi_{j,m} \rangle|$, то коэффициенты $|\langle X, \psi_{j,m} \rangle|$, превышающие данный порог, с высокой вероятностью будут детектированы. Известно [15], что на мелких масштабах такие коэффициенты возникают в окрестностях резких изменений сигнала. Поэтому, выбирая такой подход, с большой вероятностью сохраняем коэффициенты в окрестностях аномальных значений анализируемой функции. Также при выборе порога необходимо учесть, что в соответствии со свойствами частотно-временного окна вейвлет-преобразования [14] детектирующая способность вейвлетов уменьшается с ростом масштаба. Поэтому логично адаптировать порог к масштабу. Получаем следующий алгоритм построения аппроксимирующих схем в словаре базисов вейвлет-пакетов:

1. Выполняем разложение функции f в вейвлет-пакеты:

$$W_j^0 : W_j^0 = \bigoplus_{i=0}^I W_{j_i}^{p_i}, \quad \left\{ \Psi_{j_i}^{p_i}(2^{j_i}t - m) \right\}_{m \in N} \quad \text{есть базис пространства } W_{j_i}^{p_i};$$

2. Определяем ветви дерева, соответствующие структурным компонентам сигнала, базис $O_{j_i}^p$ пространства $W_{j_i}^p$ есть базис:

$$O_{j_i}^p = \begin{cases} \left\{ \Psi_{j_i}^p (2^{j_i} t - m) \right\}_{m \in Z}, \\ \text{если } \sum_{m \in I_M^p} |\langle X, \Psi_{j_i, m}^p \rangle|^2 \geq \sum_{m \in I_M^{2p}} |\langle X, \Psi_{j_i+1, m}^{2p} \rangle|^2 + \sum_{m \in I_M^{2p+1}} |\langle X, \Psi_{j_i+1, m}^{2p+1} \rangle|^2, \\ \left\{ \Psi_{j_i+1}^{2p} \right\}_{m \in Z} \cup \left\{ \Psi_{j_i+1}^{2p+1} \right\}_{m \in Z}, \\ \text{если } \sum_{m \in I_M^p} |\langle X, \Psi_{j_i, m}^p \rangle|^2 < \sum_{m \in I_M^{2p}} |\langle X, \Psi_{j_i+1, m}^{2p} \rangle|^2 + \sum_{m \in I_M^{2p+1}} |\langle X, \Psi_{j_i+1, m}^{2p+1} \rangle|^2, \end{cases}$$

где множество индексов I_M^l , $l = P, 2P, 2P + 1$ определяются так:

$$\text{индекс } m \in I_M^l, \quad \text{если } |\langle X, \Psi_{j_i, m}^l \rangle| \geq T_{j_i}, \quad \text{порог } T_{j_i} = K \cdot \sigma_{j_i}^l,$$

$$\sigma_{j_i}^l = \sqrt{\frac{1}{l} \sum_{m=1}^l \left(\langle X, \Psi_{j_i, m}^l \rangle - \overline{\langle X, \Psi_{j_i, m}^l \rangle} \right)^2}.$$

Выполненные в статье оценки показали, что получаемые пороги $T_{j_i} = K \cdot \sigma_{j_i}^l$ при $K = 2,5$ превышают оптимальный порог $T = \sigma \sqrt{2 \ln N}$, что увеличивает риск. Но учитывая, что пороговые оценки в словаре вейвлет-пакетов дают почти минимаксный риск для сигналов с ограниченной вариацией, можно с уверенностью предположить, что потери при используемом подходе невелики.

На основе алгоритма получаем

$$(5) \quad \tilde{f}(t) = \sum_{(j_i, m) \in Q_M^l} \langle X, \psi_{j_i, m} \rangle \psi_{j_i, m}(t) = \sum_{(j_i, m) \in Q_M^l} v_{j_i, m} \psi_{j_i, m}(t),$$

где

$$(j_i, m) \in Q_M^p : j_i \in O_{j_i}^p, \quad m \in I_M^l.$$

На рис. 1 представлен результат построения аппроксимирующей схемы с применением вейвлета Койфлет 2. Построение выполнялось по данным нейтронного монитора станции Инувик (68.35N, -133.72W) за период высокой солнечной активности (2013–2015 гг.). Цифрами в узлах дерева показаны значения функции стоимости. Выбранные узлы показаны серым цветом. Анализ показывает, что структурные составляющие сигнала включают аппроксимирующие (левая ветка дерева) и детализирующие (правая ветка дерева) компоненты 4-го уровня разложения.

На рис. 2 представлены выделенные детализирующие компоненты дерева. В верхней части рис. 2 показан исходный сигнал. Анализ результатов подтверждает эффективность метода, который детектировал особенности малой

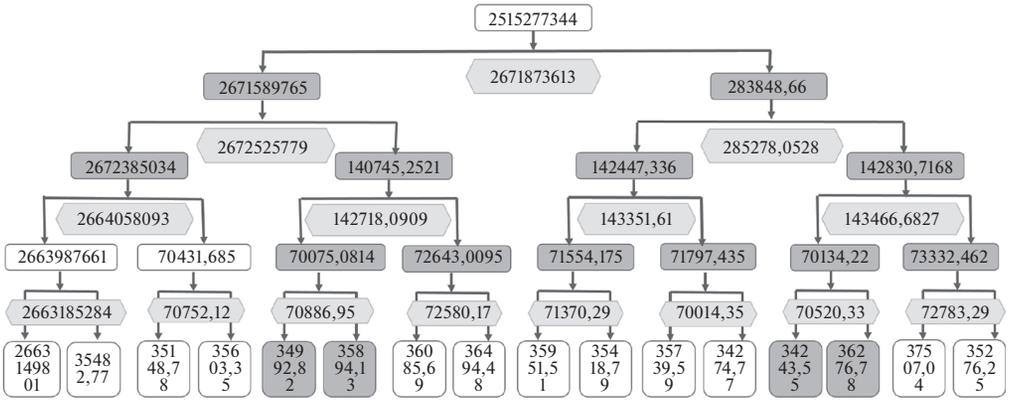


Рис. 1. Построенное дерево вейвлет-пакета с применением вейвлета Койфлет 2, выделенные компоненты обозначены серым цветом.

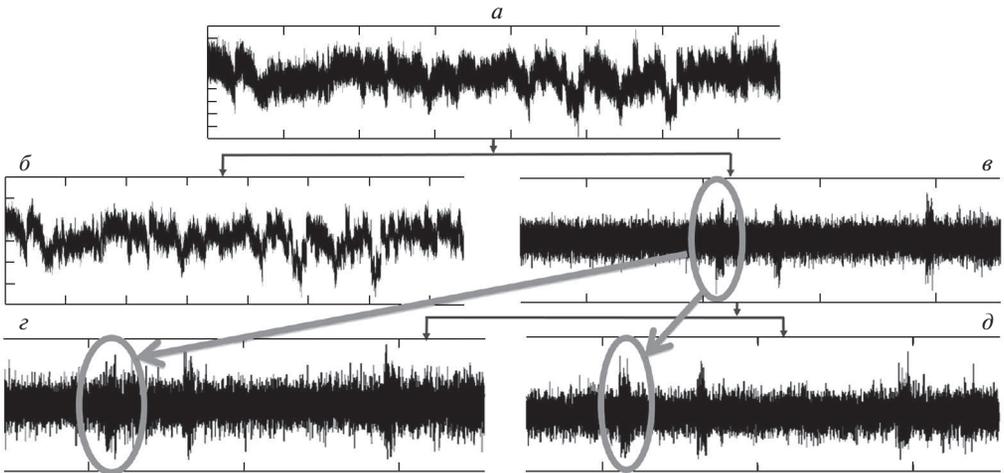


Рис. 2. *a* — Отображение в пространство W_L^0 ; *б* — отображение в пространство W_{L+1}^0 ; *в* — отображение в пространство W_{L+1}^1 ; *г* — отображение в пространство W_{L+2}^2 ; *д* — отображение в пространство W_{L+2}^3 .

амплитуды, незначительно превышающие фоновые вариации космических лучей и практически неразличимые в шуме.

Пример применения метода для обнаружения Форбуш-эффекта малой амплитуды показан на рис. 3. По данным Центра прогноза космической погоды ИЗМИРАН [16] Форбуш-эффект малой амплитуды произошел 3 марта (отмечено вертикальной пунктирной линией). На рис. 3,а и 3,б изображены соответственно данные нейтронного монитора станции Москва за 1–5 марта 2014 г. и их вейвлет-спектр (применялось непрерывное вейвлет-преобразование). На рис. 3,в и 3,г показана выделенная компонента и ее вейвлет-спектр. Анализ результатов показывает, что из-за наличия высокого

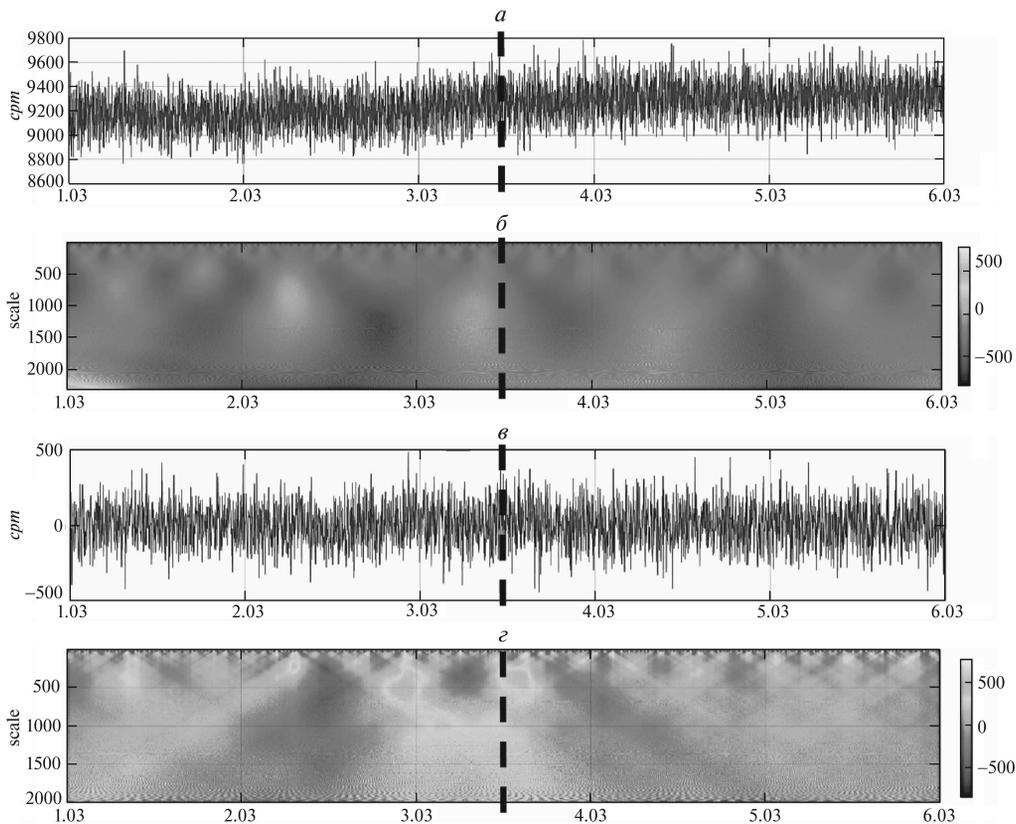


Рис. 3. *a* — Регистрируемые данные нейтронного монитора ст. Москва, *б* — вейвлет-спектр сигнала, *в* — выделенная компонента дерева, *г* — вейвлет-спектр компоненты.

уровня шума обнаружить Форбуш-эффект в зашумленных данных не удалось (см. рис. 3,*б*). Применение метода позволило детектировать Форбуш-эффект в сигнале (рис. 3,*г*), что подтверждает эффективность предлагаемого подхода.

На рис. 4 показан период, содержащий несколько спорадических эффектов. По данным ИЗМИРАН [21] Форбуш-эффекты произошли 18, 20, 25, 29 и 31 марта. Периоды Форбуш-эффектов отмечены на рис. 4 овалами. Результат применения метода (рис. 4,*б*) показывает его эффективность для задачи обнаружения спорадических эффектов. Отметим, что по данным обработки в анализируемый период Форбуш-эффект также произошел 14 марта (рис. 4,*б*). Но в базе данных ИЗМИРАН [21] он не указан. По данным прогноза космической погоды [22, 23] в связи с пересечением секторной границы межпланетного магнитного поля (ММП) и из-за прихода ускоренного потока от слабоконтрастной корональной дыры вертикальная компонента ММП 13 марта приняла значение $B_z = -10$ нТл, скорость солнечного ветра увеличилась от 300 до 600 км/с и 14 марта превысила 650 км/с. По указанным

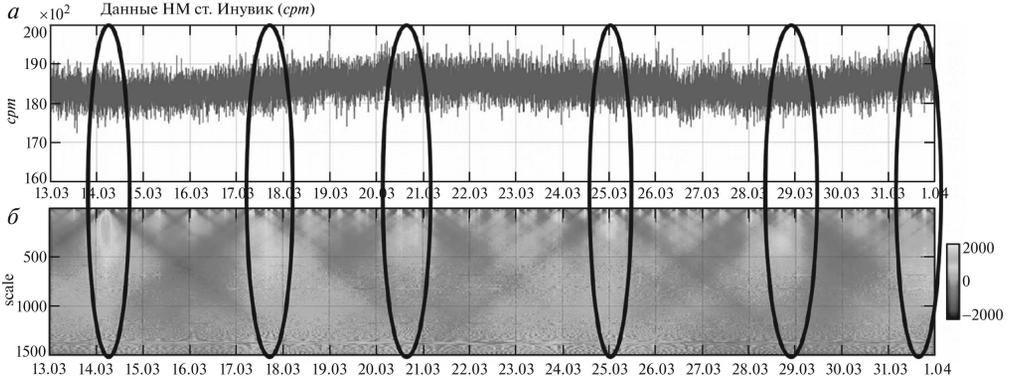


Рис. 4. *a* — Данные нейтронного монитора ст. Инувик, *b* — вейвлет-спектр выделенной компоненты сигнала.

факторам космической погоды можно сделать вывод о высокой возможности обнаружения спорадических эффектов в космических лучах, что подтверждает эффективность метода.

2.2. Алгоритм обнаружения аномальных эффектов на основе суперпозиции конструкций вейвлет-преобразования

По результатам экспериментов спорадические эффекты в вариациях космических лучей имеют многомасштабную структуру и детектируются в разных компонентах дерева вейвлет-пакетов. В этом случае эффективность их обнаружения может быть повышена на основе совмещения нелинейных аппроксимирующих схем с непрерывным вейвлет-преобразованием. Учитывая свойства частотно-временного окна вейвлет-преобразования [14], лучший результат в этом случае даст применение адаптивного порога, зависящего от масштаба. Предлагаемый алгоритм представлен.

1. Построение аппроксимирующей схемы в базе вейвлет-пакетов (см. (5)):

$$\tilde{f}(t) = \sum_{(j_i, m) \in Q_M^l} \langle X, \psi_{j_i, m} \rangle \psi_{j_i, m}(t) = \sum_{(j_i, m) \in Q_M^l} v_{j_i, m} \psi_{j_i, m}(t),$$

где $(j_i, m) \in Q_M^p : j_i \in O_{j_i}^p, m \in I_M^l$.

2. Выполнение непрерывного вейвлет-преобразования и применение пороговой функции:

$$(6) \quad P(W_\Psi f_{a,b}) = \begin{cases} W_\Psi f_{a,b}, & \text{если } |W_\Psi f_{a,b} - W_\Psi f_{a,b}^{med,l}| \geq T_a^l, \\ 0, & \text{если } |W_\Psi f_{a,b} - W_\Psi f_{a,b}^{med,l}| < T_a^l, \end{cases}$$

где $W_\Psi \tilde{f}_{a,b} = |b|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{f}(t) \Psi\left(\frac{t-a}{b}\right) dt$ — непрерывное вейвлет-преобразование, $W_\Psi f_{a,b}^{med,l}$ — медианное значение, $T_a^l = U \cdot \sigma_a^l$ — порог, $\sigma_a^l =$

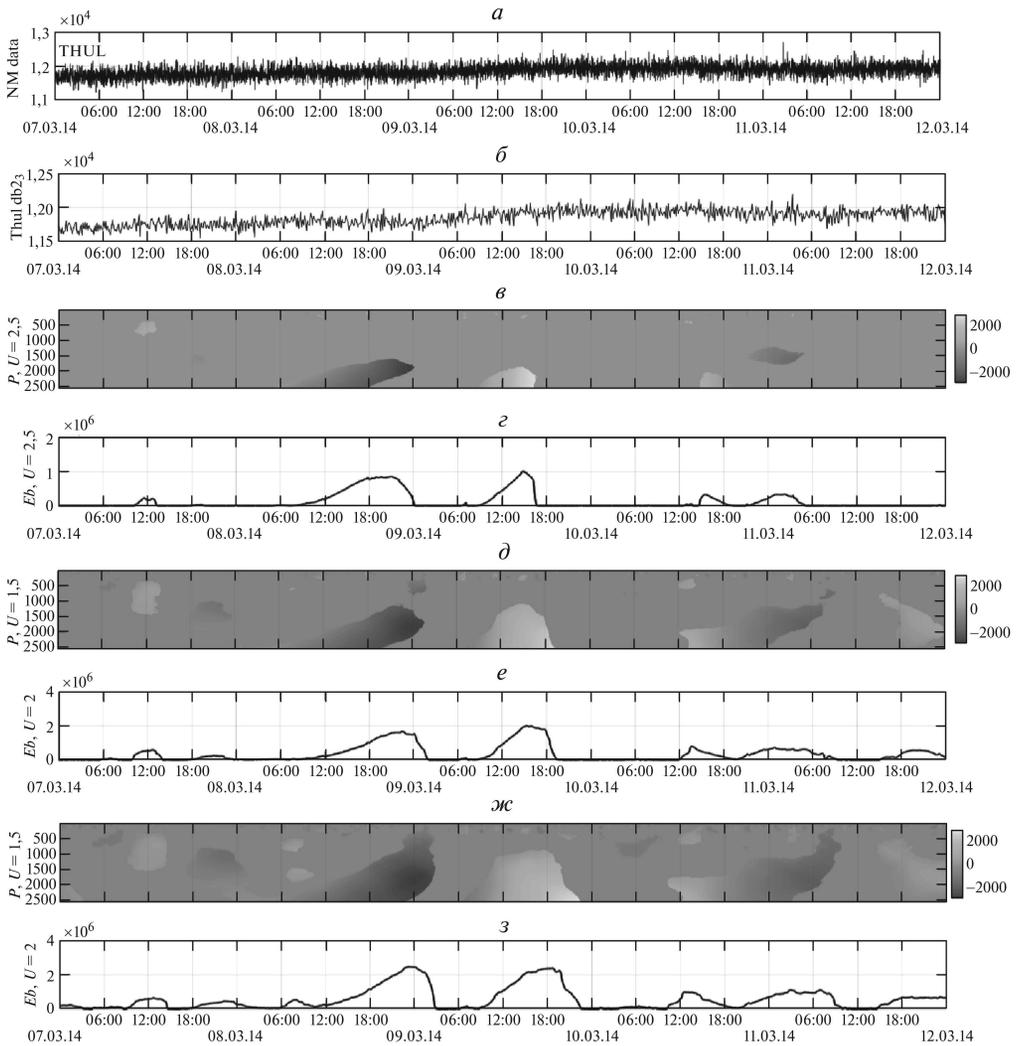


Рис. 5. *a* – данные нейтронного монитора, *б* – операция (5), *в* – операция (6), $U = 2,5$, положительные аномалии отмечены белым, отрицательные – черным, *г* – операция (7), $U = 2,5$, *д* – операция (6), $U = 2$, *е* – операция (7), $U = 2$, *ж* – операция (6), $U = 1,5$, *з* – операция (7), $U = 1,5$.

$$= \sqrt{\frac{1}{l} \sum_{k=1}^l (W_{\Psi} f_{a,b} - \overline{W_{\Psi} f_{a,b}})^2}$$
 – стандартное отклонение, $\overline{W_{\Psi} f_{a,b}}$ – медиана,
 U – пороговый коэффициент.

3. Оценка интенсивности аномалий:

$$(7) \quad SUM_b = \sum_a P_a (W_{\Psi} \tilde{f}_{a,b}).$$

Результаты применения алгоритма по данным станции Туле представлены на рис. 5. На рис. 5, *ж*, 5, *з*, 5, *д* и 5, *е* показаны результаты алгоритма с

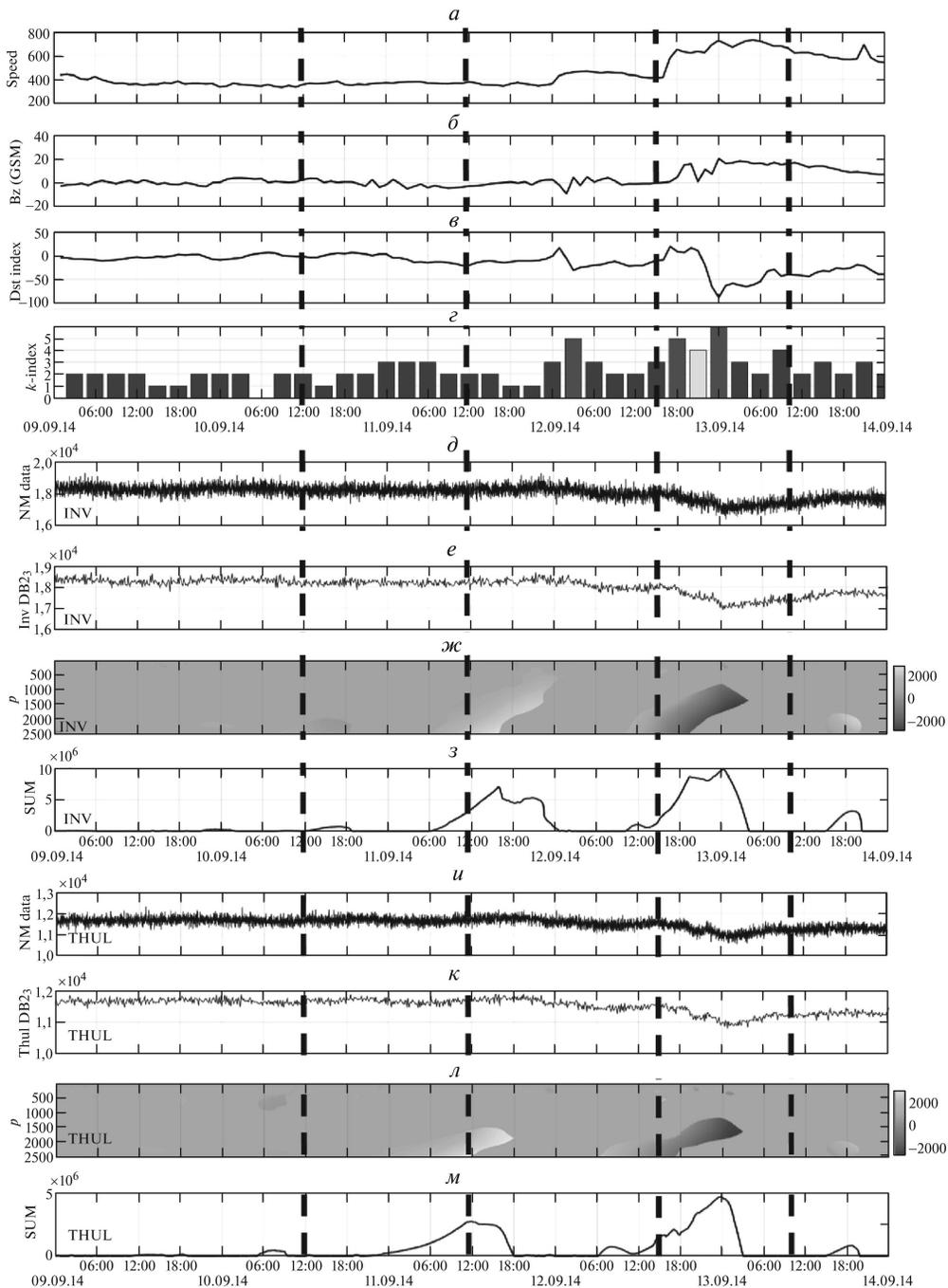


Рис. 6. *a* — скорость солнечного ветра км/с, *б* — BZ ММП, *в* — Dst-индекс, *г* — *k*-индекс геомагнитной активности, *д* — регистрируемые данные НМ ст. Инувик, *е* — операция (5), *ж* — операция (6), *з* — операция (7), *и* — регистрируемые данные НМ ст. Туле, *к* — операция (5), *л* — операция (6), *м* — операция (7).

коэффициентами $U = 1,5$ и $U = 2$ (см. операции (6) и (7)). В соответствии с алгоритмом коэффициент $U = 1,5$ позволяет детектировать вариации, превышающие по амплитуде от $1,5\sigma$ и более, а коэффициент $U = 2$ — от 2σ и более. Анализ результатов показывает, что при использовании коэффициента $U = 1,5$ (рис. 5,ж и 5,з) детектируются колебания интенсивности космических лучей, связанные с суточным ходом. Применение коэффициента $U = 2$ (рис. 5,д и 5,е) позволяет детектировать аномальные изменения в данных космических лучей, но суточные вариации также присутствуют. Наилучшие результаты показывает коэффициент $U = 2,5$ (рис. 5,в и 5,г) — отсутствие вариаций, связанных с суточным ходом и детектирование спорадических эффектов.

На рис. 6 представлено применение метода с использованием данных станции Инувик и Туле [6]. В начале анализируемого периода 11 сентября из-за ускоренного потока от коронального выброса скорость солнечного ветра возросла до 480 км/с (рис. 6,а) [22], южная V_z ММП опустилось до -14 нТл (рис. 6,б). Далее, 12 сентября скорость солнечного ветра резко увеличилась до 800 км/с, южная компонента ММП опустилась до значений $V_z = -17$ нТл. По данным космической погоды [22] в течение данного периода зарегистрировано 4 геомагнитных бури: 10, 11, 12 и 13 сентября. Моменты регистрации магнитных бурь отмечены на рис. 6 вертикальной пунктирной линией. При идентификации некоторых событий обнаружение аномалии предложенным методом отстает или опережает на несколько часов время, указанное в [22], что не является погрешностью метода, поскольку поток космических лучей приходит на Землю анизотропно и один и тот же Форбуш-эффект на разных станциях возникает с разной интенсивностью и в разное время. Результаты подтверждают эффективность метода.

3. Заключение

Эмпирически доказана эффективность предлагаемого метода для обнаружения спорадических эффектов в вариациях космических лучей. Рекомендовано использование большего порога, увеличивающего риск, но позволяющего получить более точные оценки. Показано, что применение суперпозиции вейвлет-пакетов и непрерывного вейвлет-преобразования позволяет повысить эффективность детектирования Форбуш-эффектов разной структуры. Полученные результаты представляют интерес в задаче прогноза космической погоды.

В дальнейшем планируется продолжить исследование в данном направлении с привлечением данных сети станций высоких и средних широт с целью оптимизации метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цурко В.В., Михальский А.И. Моделирование данных при анализе рисков здоровью и продолжительности жизни человека // *АиТ*. 2018. № 10. С. 164–182.
Zurko V., Mikhailskii A. Data Modeling for the Analysis of Health Risks and Human Longevity // Autom. Remote Control. 2018. V. 79. No. 10. P. 1871–1885.

2. *Агеев И.А., Бурков В.Н., Зинченко В.И., Киселева Т.В.* Структурный анализ временных рядов данных // *АиТ.* 2005. № 6. С. 161–169.
Ageev I.A., Burkov V.N., Zinchenko V.I., Kiseleva T.V. Structural Analysis of the Time Data Series // *Autom. Remote Control.* 2005. V. 66. No. 6. P. 995–1002.
3. *Щербань И.В., Кириленко Н.Е., Красников С.О.* Метод поиска неизвестных высокочастотных осцилляторов в составе зашумленных сигналов на основе непрерывного вейвлет-преобразования // *АиТ.* 2019. № 7. С. 122–133.
Shcherban I.V., Kirilenko N.E., Krasnikov S.O. A Search Method for Unknown High-frequency Oscillators in Noisy Signals Based on the Continuous Wavelet Transform // *Autom. Remote Control.* 2019. V. 80. No. 7. P. 1279–1287.
4. *Mandrikova O., Stepanenko A.* Automated Method for Calculating the Dst-index Based on the Wavelet Model of Geomagnetic Field Variations // *Comp. Optics.* 2020. V. 44. Iss. 5. P. 797–808.
5. *Топтыгин И.Н.* Космические лучи в межпланетных магнитных полях. М.: Наука, 1983.
6. Real time data base for the measurements of high-resolution Neutron Monitor. [Электронный ресурс]. www.nmdb.eu (дата обращения 01.11.2020).
7. *Сокуров В.Ф.* Физика космических лучей: космическая радиация. Ростов н/Д.: Феникс, 2005.
8. *Дорман Л.И.* Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975.
9. *Belov A.V., et al.* Global Survey Method for the World Network of Neutron Monitors // *Geomagn. Aeron.* 2018. V. 58. P. 356–372.
10. *Abunina M.A., et al.* Ring of Stations Method in Cosmic Rays Variations Research // *Sol. Phys.* 2020. V. 69. No. 295.
11. *Mandrikova O.V., Solovev I.S., Zalyaev T.L.* Methods of Analysis of Geomagnetic Field Variations and Cosmic Ray Data // *Earth Planet Space.* 2014. V. 66. No. 148.
12. *Mandrikova O.V., et al.* Methods of Analysis of Geophysical Data During Increased Solar Activity // *Pattern Recognition and Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications).* 2016. V. 26. No. 2. P. 406–418.
13. *Мандрикова О.В., Залаяев Т.Л.* Моделирование вариаций космических лучей на основе совмещения кратномасштабных вейвлет-разложений и нейронных сетей переменной структуры // *Цифровая обработка сигналов.* 2015. № 1. С. 11–16.
14. *Chui C.K.* An introduction in wavelets. N.Y.: Acad. Press, 1992.
15. *Mallat S.* A wavelet tour of signal processing. London: Acad. Press, 1999.
16. *Herley C., et al.* Tilings of the Time-Frequency Plane: Construction of Arbitrary Orthogonal Bases and Feist Tiling Algorithms // *IEEE Trans. Signal Process. Special Issue on Wavelets and Signal Processing.* 1993. P. 3341–3359.
17. *Chen S., Donoho D.* Atomic Decomposition by Basis Pursuit // *Technical Report.* Stanford University, 1995.
18. *Mallat S.G., Zhang Z.F.* Matching Pursuits with Time-frequency Dictionaries // *IEEE Trans. Signal Processing.* 1993. V. 41. No. 12. P. 3397–3415.
19. *Coifman R.R., Wickerhauser M.V.* Entropy-based Algorithms for Best Basis Selection // *IEEE Trans. Inform. Theory.* 1992. V. 38. No. 2. P. 713–718.
20. *Donoho D.L., Johnstone I.M.* Ideal Spatial Adaptation Via Wavelet Shrinkage // *Биометрика.* 1994. No. 81. P. 425–455.

21. Центр прогнозов космической погоды ИЗМИРАН. Каталог Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений [Электронный ресурс].
<http://spaceweather.izmiran.ru/rus/fds2019.html> (дата обращения 11.11.2020).
22. Forecast of space weather according to the data of Federov Institute of Applied Geophysics [Электронный ресурс]. <http://ipg.geospace.ru> (дата обращения 01.12.2020).
23. NASA Interface to produce plots listings or output files from OMNI 2 [Электронный ресурс]. <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> (дата обращения 11.11.2020).

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Лазаревым.

Поступила в редакцию 24.01.2021

После доработки 26.04.2021

Принята к публикации 30.06.2021