
doi: <https://doi.org/10.15407/knit2018.06.057>

УДК 551.510.535:551.511.314

Г. В. Лизунов, Т. В. Скороход

Институт космических исследований Национальной академии наук Украины
и Государственного космического агентства Украины, Киев, Украина

О СЕЛЕКЦИИ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ФОНЕ ТРЕНДОВ В ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ТЕРМОСФЕРЫ

Регистрация волновых процессов в атмосфере/ионосфере сталкивается с трудностью распознавания волновых возмущений на фоне мощных низкочастотных трендов атмосферных/ионосферных параметров. Общепринятым подходом к выделению волновых возмущений в таких условиях является исключение тренда из исходного ряда данных. Но различные методы аппроксимации тренда, используемые разными группами исследователей, порождают на выходе различные профили волн. Особенно заметно различия проявляются в спектральной области, в которой, в зависимости от метода вписывания тренда, усиливаются или подавляются различные частотные составляющие волнового процесса. Цель работы — построение корректного метода декомпозиции сигнала на тренд и волновой процесс для случая, когда тренд и волна разделены между собой в частотной области (что характерно, в частности, для акустических и гравитационных типов волн в термосфере Земли). Методы исследования — цифровая обработка сигналов и спектральный анализ. В работе развиты физические подходы и математический аппарат обработки данных. Верификация метода произведена на модельных наборах данных. Впервые поставлена и решена задача оценки погрешности, которую процедура декомпозиции сигнала вносит в характеристику волны. С этой целью анализ погрешности перенесен из пространственно-временной в спектральную область. В области масштабов атмосферных акустических и гравитационных волн погрешность разрешения спектра волн составляет 1...5 %. Указанная погрешность возникает из первых принципов (оценка частоты на конечном интервале накопления данных) и не может быть устранена за счёт «более тщательной» обработки данных. Выяснена природа трудности декомпозиции сигнала на тренд и волну, которая обусловлена растеканием спектра тренда — артефактом цифровой обработки сигнала. Ключом к выделению волновых возмущений является двойная фильтрация данных. На первом этапе производится грубое исключение тренда, ставящее целью устранение перекрытия спектра тренда и волны при условии невнесения искажений в диапазон частот полезного сигнала. На втором этапе остаточный ряд данных пропускается через идеальный фильтр, настроенный на полосу частот волнового процесса. После соответствующей адаптации метод обработки данных, развитый в работе, может быть применён к анализу дистанционных наблюдений ионосферы и к анализу данных других областей исследований.

Ключевые слова: волновые процессы, верхняя атмосфера, космический эксперимент, цифровая обработка сигналов, спектральный анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Регистрация волновых процессов в верхней атмосфере Земли, включая её плазменный компонент — ионосферу, во многих случаях сталкива-

ется с трудностью распознавания волновых возмущений на фоне мощных низкочастотных вариаций атмосферных параметров — трендов. Продемонстрируем суть указанной трудности на примере, взятом из области спутниковых наблюдений термосферных волн.

© Г. В. ЛИЗУНОВ, Т. В. СКОРОХОД, 2018

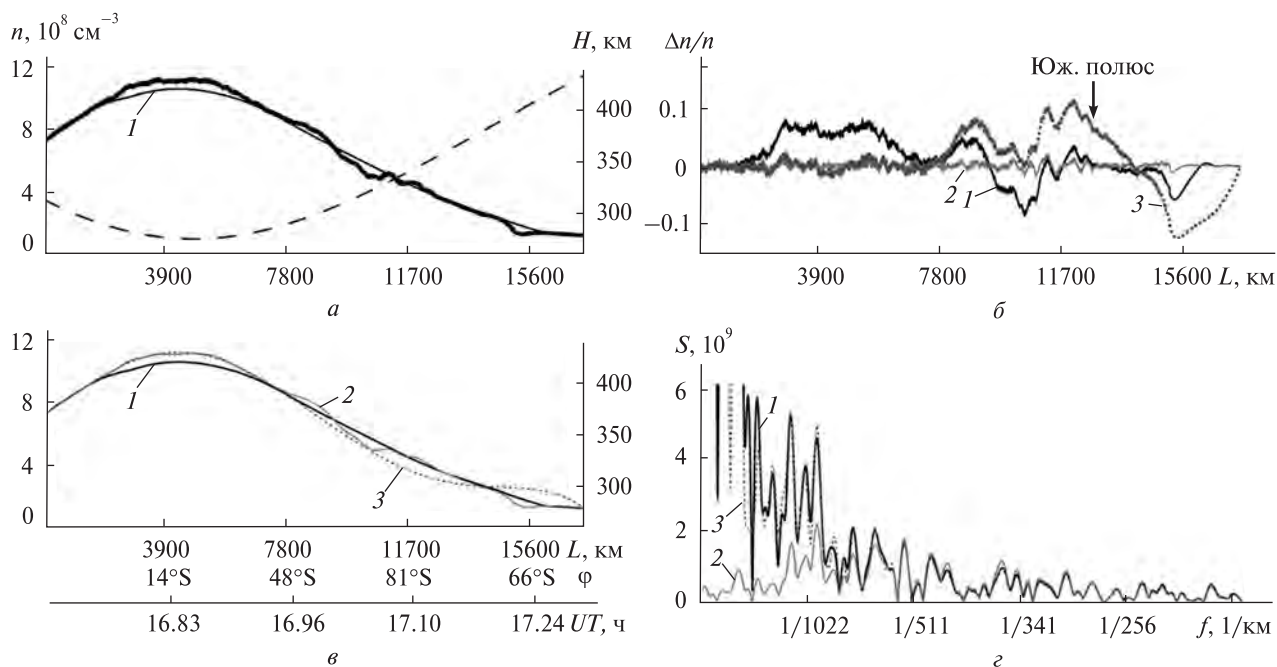


Рис. 1: а — распределение концентрации атомарного кислорода вдоль одного из орбитальных витков спутника DE-2 (жирная сплошная кривая) и высота спутника (штриховая кривая); б — тренды (1 — аппроксимации тренда скользящим средним по 700 отсчётам, 2 — скользящим средним по 70 отсчётам, 3 — полиномом шестой степени); в — соответствующие волновые профили; г — их амплитудные спектры

На рис. 1 приведена эпюра данных спутника DE-2 с записью хода концентрации нейтральных частиц вдоль орбиты спутника. Можно видеть, что на протяжении сеанса измерений, который в данном случае длился около половины орбитального витка, концентрация изменилась почти на порядок величины (главным образом в результате изменения высоты спутниковой орбиты), благодаря чему данные содержат значительную трендовую составляющую. «Рябь» на экспериментальной кривой является волновым процессом, подлежащим регистрации.

Общепринятым подходом к выделению волновых возмущений в таких случаях является исключение тренда из исходных данных с помощью того или иного алгоритма его аппроксимации. На рис. 1 показаны три примера аппроксимации тренда, практически использовавшиеся разными группами исследователей. Неудивительно, что разные способы построения тренда порождают на выходе отличающиеся профили волновых возмущений. Обратим внимание также на спектральную область, в которой, в зависимости от ме-

тода оценивания тренда, усиливаются или подавляются различные частотные составляющие волнового процесса. Закономерно возникает вопрос о погрешности, которую процедура фильтрации привносит в характеристику волны; этот вопрос до сих пор не ставился в литературе.

Несмотря на то что методам обработки и анализа геокосмических наблюдений посвящена обширная литература (из отечественных источников назовём монографии [1, 6]), вопросы, описанные выше, остаются открытыми. Последние годы получили распространение эвристические методы декомпозиции экспериментальных данных (например, по признаку равенства или неравенства нулю средних значений трендовой и волновой составляющих), которые, однако, не гарантируют корректности полученных решений [7, 8, 12]. Нами разработан строгий частный метод селекции волн, относящийся к случаю, когда тренд и волна разделены между собой в частотной области (что характерно, например, для условий распространения акустических и гравитационных волн в верхней атмосфере).

ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Входными для обработки служат данные контактных спутниковых измерений газодинамических параметров термосферы (концентраций газовых компонентов, температуры и скорости), собранные в результате реализации миссий АЕ-С, АЕ-Д, АЕ-Е и DE-2 в период с 1973 по 1983 гг. [7, 14–17]. Данные спутников АЕ-Е и DE-2 доступны на web-сайте НАСА «National Space Science Data Center». Эти данные имеют определённые свойства. Во-первых, отчёты измерений привязаны к местоположению спутника, и, таким образом, воспроизводят распределение атмосферного параметра относительно орбитального витка $s = s(x)$, где координата x отсчитывается вдоль траектории спутника. Соответственно преобразование Фурье возвращает исследователю одномерный пространственный спектр данных $S = S(f)$, где $f = 1/\lambda_x$ — пространственная частота, λ_x — кажущаяся длина волны (измеренная вдоль орбиты спутника). Во-вторых, известно, что изменение параметров атмосферы в течение сеанса наблюдений вызывается физическими процессами разных временных и пространственных масштабов, благодаря чему в экспериментальных данных можно выделить следующие базовые компоненты (рис. 2):

- тренд — глобальная зависимость атмосферных параметров от высоты, широты и локального времени (линия 1 на рис. 2). В верхней термосфере горизонтальный масштаб тренда обычно составляет более 10000 км;
- полезный сигнал — волновой процесс в диапазоне горизонтальных длин волн $\lambda_x = 100...2500$ км (атмосферные акустические и гравитационные волны; линия 2);
- приборные шумы, заполняющие весь спектр данных, но доминирующие в коротковолновой области (линия 3).

Поскольку тренд и волновой процесс разделены между собой в спектральной области, то для селекции волн, казалось бы, необходимо и достаточно пропустить данные через идеальный полосовой фильтр, настроенный на область частот волнового процесса (линия 4). В действительности же применение такой процедуры породит артефакты цифровой обработки данных,

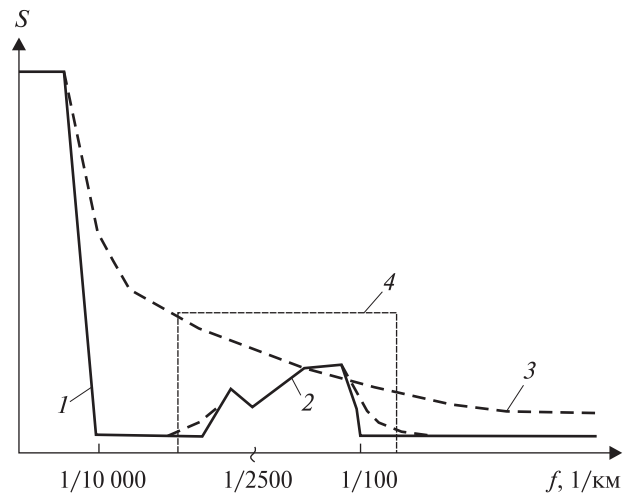


Рис. 2. Структура спектра данных: 1 — тренд, 2 — волновой процесс, 3 — приборные шумы, 4 — идеальный полосовой фильтр, штриховые линии — растекание спектра при цифровой обработке сигнала

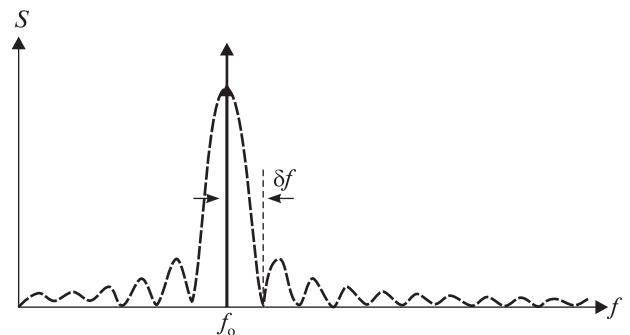


Рис. 3. Растекание спектра монохроматического сигнала (дельта-функция) на конечном интервале накопления данных (функция sinc)

целиком искажающие полезный сигнал. В литературных источниках, посвященных наблюдениям волновых процессов в термосфере, это обстоятельство до сих пор не комментировалось.

РАСТЕКАНИЕ СПЕКТРА ТРЕНДА

Введём обозначения:

$s(x)$ — ход атмосферного параметра в пространственной области (сигнал),

$\bar{s}(x)$ — его осреднённая составляющая (тренд),

$S(f)$ — результат дискретного преобразования Фурье (ДПФ) функции $s(x)$,

$x(n) = n/f_s$ — дискретная координата,

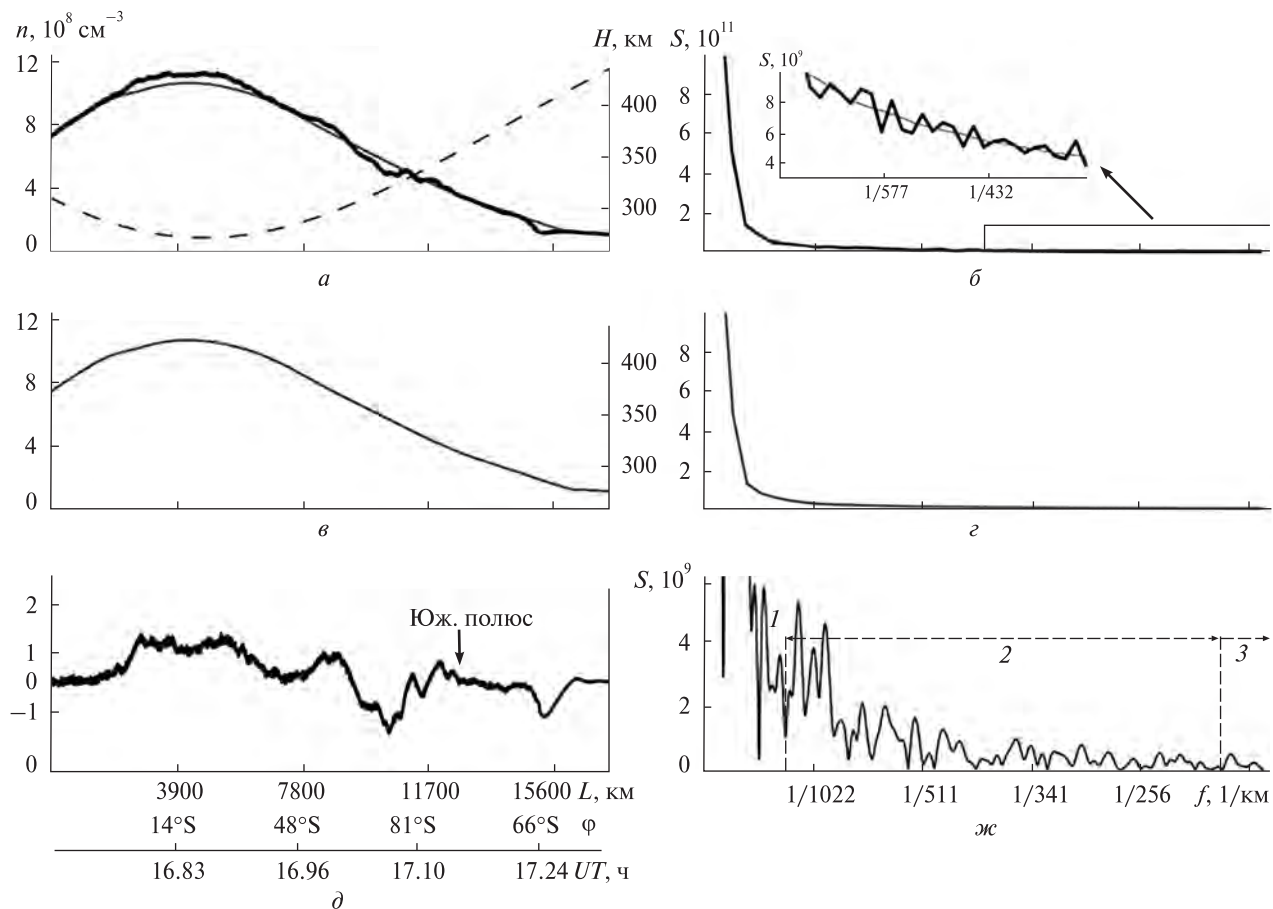


Рис. 4. Селекция волновых возмущений в экспериментальных данных: *a* — исходные данные; *б* — амплитудный спектр данных (чёрная кривая) и тренда (серая кривая); *в* — тренд; *г* — амплитудный спектр тренда; *д* — разностный сигнал; *ж* — амплитудный спектр разностного сигнала (*1* — остатки тренда, *2* — волновой диапазон, *3* — шумы)

f_x — пространственная частота дискретизации,

$f(m) = mf_s/N$ — дискретная частота,

L — длина сеанса измерения вдоль орбиты спутника (интервал накопления данных),

$N = f_s L$ — количество отсчётов в ряде данных,

$n, m = 0, N - 1$.

Продолжительность сеансов измерений атмосферных параметров в спутниковых экспериментах обычно не превышала $L = 10000 \dots 20000$ км (без лагун и разрывов). Конечность параметра L порождает «растекание» монохроматических компонентов регистрируемого сигнала согласно функции sinc [2]:

$$\delta(f - f_0) \rightarrow L \text{sinc}(\pi(f - f_0)L), \quad (1)$$

где f_0 — частота монохроматического компонента сигнала, $\text{sinc}(X) = \sin(X)/X$ (рис. 3). Следствием эффекта растекания является уширение спектральных линий в пределах основного лепестка функции sinc и связанное с этим ограничение на разрешающую способность ДПФ:

$$\delta f = 1/L \text{ или } \delta f / f_0 = 1/m. \quad (2)$$

Кроме того, часть спектральной энергии растекается вдоль боковых лепестков функции sinc, как это схематически и без соблюдения пропорций показано на рис. 2 штриховыми линиями.

Рис. 4 демонстрирует растекание спектра натуральных данных. На рис. 4, б показан ампли-

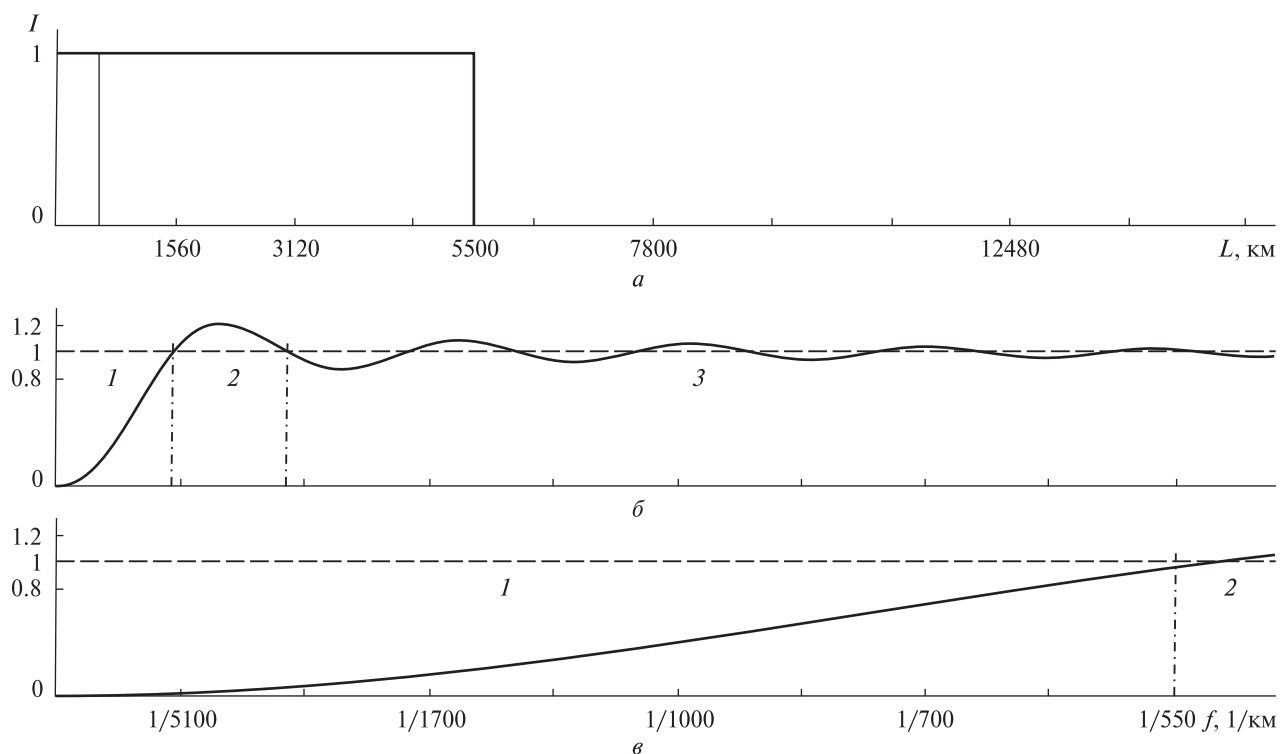


Рис. 5. Фильтр верхних частот на основе простого скользящего среднего: *a* — окно усреднения в пространственной области (тонкая кривая — длина окна 550 км, жирная кривая — 5500 км); *б* — частотная характеристика фильтра с окном 5500 км; *в* — частотная характеристика фильтра с окном 550 км. Область 1 — полоса запирающая, область 2 — полоса пульсаций, область 3 — полоса пропускания

тудный спектр ДПФ входной последовательности данных, на рис. 4, z — спектр тренда, который для сравнения воспроизведён на рис. 4, b тонкой линией. Можно видеть, что в спектральной области тренд, хотя и не является колебательным процессом, целиком «накрывает» волновую составляющую. Смещение спектров тренда и волны возникает по причине того, что вследствие растекания тренд распространяется в область частот волнового процесса. Поскольку трендовая составляющая велика, а волновая мала, высшие гармоники тренда превышают основные гармоники волны. Это делает невозможным использование полосового фильтра для селекции полезного сигнала. В таких условиях единственным решением является предварительное исключение тренда из самих исходных данных, и лишь затем — фильтрация волнового возмущения.

ИСКЛЮЧЕНИЕ ТРЕНДА

Задача этого этапа обработки состоит не в том, чтобы устранить тренд неким максимально точным образом, а только в том, чтобы уменьшить подверженную растеканию среднюю составляющую сигнала. Приемлемы разные способы аппроксимации тренда, при условии, что они обеспечивают выполнение двух требований: эффективное устранение перекрытия спектра тренда и волны, и невнесение искажений в диапазон частот полезного сигнала. Так, представление тренда интерполяционным полиномом (что является широко используемым методом усреднения данных) может порождать непредсказуемые возмущения волновой составляющей. В данной работе используется метод простого скользящего среднего — как универсальная и полностью контролируемая процедура. Единственным управляющим параметром в этом случае выступает

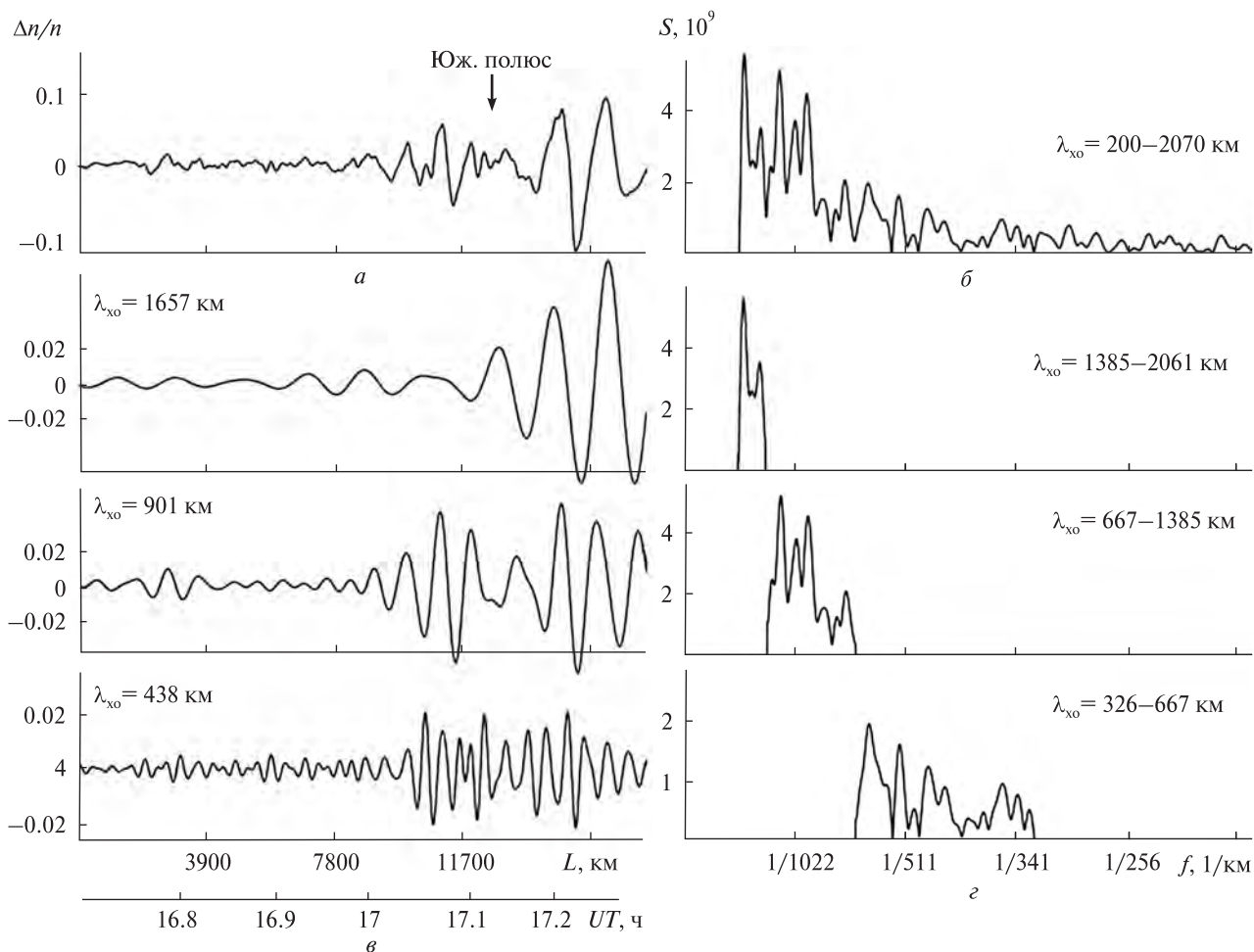


Рис. 6. Фильтрация волнового возмущения: а — волновой профили; б — амплитудный спектр; в — составляющие волновые пакеты; г — соответствующие амплитудные спектры

длина окна сглаживания данных $L_{ave} = K_{ave} / f_s$, где K_{ave} — количество отсчётов, по которым производится усреднение. Практически бра-лось $L_{ave} \sim 5000$ км. Математическая реализация фильтра скользящего среднего описана в При-ложении.

Снятие тренда скользящим средним можно трактовать как обработку входного ряда данных цифровым фильтром с частотной характеристикой:

$$H(f) = 1 - \text{sinc}(\pi f L_{ave}), \quad (3)$$

график которой представлен на рис. 5. В области частот $f > 2 / L_{ave}$ фильтр близок к идеальному (область 3 на рис. 5). В переходной полосе (об-ласть задержания 1 и область пульсаций 2)

фильтр сложным образом модифицирует исход-ный спектр данных. Эта часть спектра подлежит дальнейшему обнулению, тем более что после вычитания тренда информация о нижних часто-тах сигнала всё равно теряется.

Фильтр скользящего среднего использовал-ся ранее многими исследователями [3–5, 11, 13]. При этом параметры фильтра не всегда подбирались должным образом. В ряде случа-ев задавалось значение $L_{ave} \sim 500$ км, в то вре-мя как длины волн, подлежащих фильтрации, составляли более 600 км, т. е. лежали в полосе среза фильтра. Полученные таким образом волновые профили, очевидно, нельзя считать достоверными.

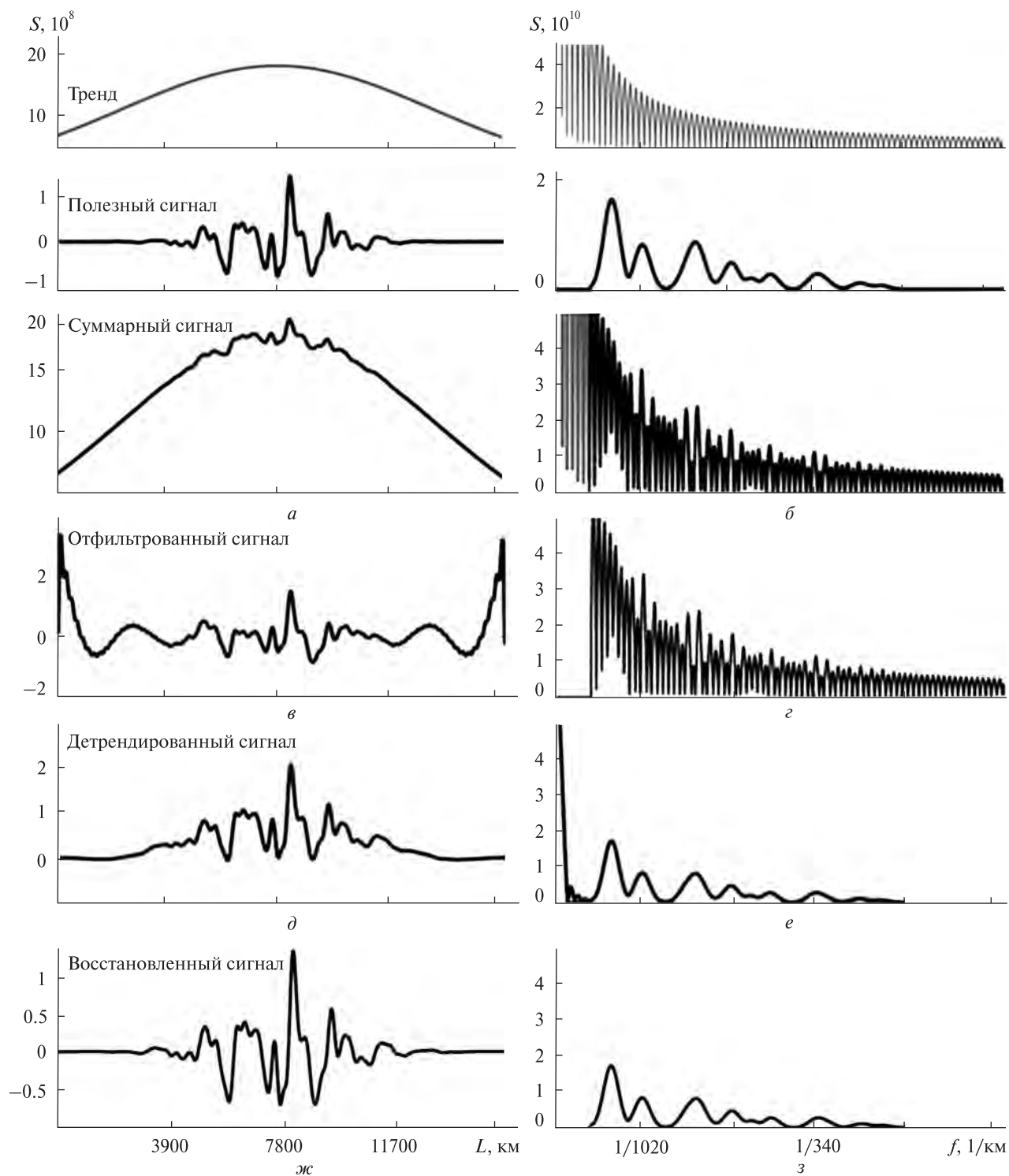


Рис. 7. Обработка модельного сигнала: *a* — входной сигнал и его составляющие, имитирующие тренд и волновое возмущение; *б* — амплитудные спектры; *в, г* — результат полосовой фильтрации входного сигнала без изъятия тренда; *д, е* — детрендированный сигнал; *ж, з* — полосовая фильтрация детрендированного сигнала

СЕЛЕКЦИЯ ВОЛНОВОГО ПРОЦЕССА

Исследуем разностный сигнал, сформированный путём исключения тренда из исходного ряда данных $\tilde{s}(x) = s(x) - \bar{s}(x)$. На рис. 4, *д, ж* представлены графики $\tilde{s}(x)$ и амплитудного спектра этой функции. В области нижних частот спектр засорён остатками тренда (область 1 на рис. 4, *ж*). Волновое возмущение выделяется в области 2. Порог обнаружения волны ограничивается уровнем шумов (область 3). Селекция волнового профиля $s_{wave}(x)$ производится путём обнуления отсчётов вне области 2 и вычислением обратного ДПФ, как показано на рис. 6. Отметим, что в частотной области волновой процесс визуально распадается на три волновых пакета: $\lambda_x = 1400 \dots 2000$ км, $\lambda_x = 660 \dots 1400$ км и $\lambda_x = 320 \dots 660$ км. Обратное ДПФ области 3 восстанавливает шумовой компонент данных $s_{noise}(x)$ (на рисунке не приведен).

Подсуммируем основные ступени алгоритма обработки.

1. Грубое удаление тренда из исходного ряда данных. Конкретный способ аппроксимации тренда не существен при условии, что процедура исключения тренда эффективно уменьшает растекающийся компонент, не внося искажений в диапазон частот волнового процесса.

2. Полосовая фильтрация спектра остаточного сигнала.

3. Построение профиля волны $s_{wave}(x)$ путём вычисления обратного ДПФ.

Волновой профиль $s_{wave}(x)$ является завершённым продуктом обработки данных. При необходимости исследователь может подвергнуть его дальнейшему анализу (вейвлет-анализу и т. п.). Отметим, что параллельно получает решение задача определения истинного хода тренда атмосферных параметров:

$$s_{trend} = s(x) - s_{wave}(x) - s_{noise}(x).$$

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДА

Описанный выше алгоритм тестировался на модельных наборах данных (селекция гармонического сигнала на фоне гауссового тренда и т. п.). Один из примеров приведен на рис. 7. Рассмотрим аналоговый сигнал:

$$\begin{aligned} s(x) = & 18 \cdot 10^8 \exp[10^{-6} \cdot (-(x-1000)^2)] + \\ & + 8 \cdot 10^6 \exp(10^{-5} \cdot (-(x-1000)^2)) \times \\ & \times \left\{ \sin\left(\frac{93\pi x}{2024}\right) + 0.5 \cdot \sin\left(\frac{97\pi x}{2024}\right) + \right. \\ & + 0.5 \cdot \sin\left(\frac{109\pi x}{2024}\right) + 1.5 \cdot \sin\left(\frac{47\pi x}{2024}\right) + \\ & + 3 \cdot \sin\left(\frac{51\pi x}{2024}\right) + 2.1 \cdot \sin\left(\frac{63\pi x}{2024}\right) + \\ & + 0.9 \cdot \sin\left(\frac{70\pi x}{2024}\right) + 1.2 \cdot \sin\left(\frac{77\pi x}{2024}\right) + \\ & \left. + 7 \cdot \sin\left(\frac{20\pi x}{2024}\right) + 3.5 \cdot \sin\left(\frac{31\pi x}{2024}\right) \right\}, \quad (4) \end{aligned}$$

где первая составляющая в правой части имитирует тренд, другие — волновой процесс, состоящий в данном случае из трех волновых пакетов, каждый из которых, в свою очередь, содержит несколько несущих частот. Амплитуда волны составляет около 1 % величины тренда. График сигнала (4) показан на рис. 7, *а*. Отметим, что фурье-спектры аналитических зависимостей тренда и волны не перекрываются между собой. Цифровая обработка производится на интервале накопления данных $L = 15600$, имитирующем условия космического эксперимента. В результате дискретизации сигнала на этом интервале происходит растекание спектра — как тренда, так и волны, причем хвост спектра тренда целиком поглощает полезный сигнал (рис. 7, *б*). На рис. 7, *в* показана попытка фильтрации исходных данных без изъятия тренда. Как и следовало ожидать, характеристики волнового процесса существенно искажаются. На рис. 7, *д* — *з* представлен результат селекции волнового процесса по методу данной работы. Погрешность восстановления волнового профиля составляет 0.25 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, ключом к селекции волновых возмущений на фоне трендов является своеобразная двойная фильтрация данных. На первом этапе производится грубое исключения тренда

(в данной работе — методом простого скользящего среднего, но это не единственный способ устранения тренда, здесь важно проследить, чтобы частотная характеристика тренда не искажала полезный сигнал). На втором этапе остаточный ряд данных пропускается через идеальный фильтр, настроенный на полосу частот волнового процесса. В области спутниковых наблюдений термосферы нам известна единственная работа [10], в которой вышеописанный подход был ранее концептуально реализован.

Приведенное исследование основано на пошаговом контроле изменений, которые обработка данных вносит в частотное представление данных. Благодаря этому удалось выяснить природу сложности декомпозиции сигнала на волну и тренд, заключающуюся не в наличии тренда как такового, а в растекании спектра тренда — артефакте цифровой обработки сигнала, приводящем к перекрытию спектра тренда и спектра волны. В спектральную область также перенесен анализ погрешностей. В области масштабов атмосферных акустических и гравитационных волн погрешность разрешения частотного состава волн составляет $\delta f/f = \delta\lambda_x/\lambda_x = 1/m \sim 1...5\%$. Данная погрешность возникает из первых принципов (оценка частоты на конечном интервале накопления данных) и не может быть устранена за счёт «более тщательной» обработки данных.

Можно надеяться, что дальнейшее применение метода данной работы позволит ввести в научный оборот большой массив измерений старых спутников (в том числе данных измерений концентраций газовых компонентов термосферы прибором NACS), до сих пор мало востребованных из-за сложностей фильтрации полезного сигнала. После соответствующей адаптации метод может быть применён к обработке экспериментальных данных в других предметных областях.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Алгоритм исключения тренда методом скользящего среднего

Усреднение данных производится с использованием простого скользящего среднего:

$$\bar{s}(n) = \frac{1}{2K+1} \sum_{i=-K/2}^{K/2} s(n+i), \quad (A1)$$

где нечётное число $2K+1 = K_{ave}$ — количество отсчётов, по которым вычисляется среднее арифметическое. Важную роль играет выбор способа суммирования отсчётов на краях ряда данных $n < K$ и $n > N - K$. Одна из возможностей состоит в формировании недостающих отсчётов путём периодического продолжения ряда: $s(n+N) = s(n)$. В этом случае справедлива теорема о круговой свёртке, согласно которой спектр суммы (A1) равен

$$\bar{S}(m) = G(m) \cdot S(m), \quad (A2)$$

где $\bar{S}(m)$ — ДПФ трендовой составляющей, $G(m)$ — частотная характеристика фильтра скользящего среднего [2]:

$$G(m) = \frac{1}{K_{ave}} \frac{\sin(\pi m K_{ave} / N)}{\sin(\pi m / N)}. \quad (A3)$$

В рабочем диапазоне частот $m \ll N$ функция (A3) переходит в sinc:

$$G(m) \approx \text{sinc}(\pi m K_{ave} / N). \quad (A4)$$

Тогда спектр ДПФ разностного сигнала $\tilde{s}(n) = s(n) - \bar{s}(n)$ равен

$$\begin{aligned} \tilde{S}(m) &= S(m) - \bar{S}(m) = \\ &= (1 - G(m))S(m) = H(m)S(m), \end{aligned} \quad (A5)$$

где

$$H(m) = 1 - \text{sinc}(\pi m K_{ave} / N). \quad (A6)$$

Переходя к физическим параметрам — частоте $f = m f_s / N$ и длине интервала усреднения $L_{ave} = K_{ave} / f_s$, приводим функцию $H(m)$ к виду (3) из основной части статьи.

На практике на краях ряда данных следует использовать другой способ вычисления суммы (A1):

$$\bar{s}(1) = s(1),$$

$$\bar{s}(2) = [s(1) + s(2) + s(3)] / 3,$$

$$\bar{s}(3) = [s(1) + s(2) + s(3) + s(4) + s(5)] / 5$$

и т. д. вплоть до $n = K$, и аналогичным образом при $n > N - K$. Такая процедура эквивалентна взвешиванию данных окном, плавно обнуляющим сигнал на краях интервала измерения, что

подавляет растекание спектра сигнала. В этом случае частотную характеристику фильтра (А6) следует рассматривать как приближённую.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Сверхширокополосные сигналы и процессы: Монография. — Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2009. — 576 с.
2. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ. — М.: ООО Бином-Пресс, 2006. — 656 с.
3. Скороход Т. В., Лизунов Г. В. Локализованные пакеты акустико-гравитационных волн в ионосфере // Геоматематизм и аэрономия. — 2012. — 52, № 1. — С. 1—6.
4. Фаткуллин М. Н., Заруцкая Е. В., Фаткуллина В. А. Глобальные пространственные характеристики среднemasштабных волнообразных неоднородностей на высотаз области F ионосферы при различных уровнях магнитосферной активности. — М.: ИЗМИРАН, 1990. — Препринт № 41 (926).
5. Федоренко А. К. Відтворення характеристик атмосферних гравітаційних хвиль в полярних регіонах на основімас-спектрометричних супутникових вимірювань // Радиофизика и радиоастрономия. — 2009. — 14, № 3. — С. 254—265.
6. Черногор Л. Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография. — Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2009. — 386 с.
7. Dalgarno A., Hanson W. B., Spencer N. W., Schmerling E. R. The Atmosphere Explorer mission // Radio Sci. — 1973. — 8, N 4. — P. 263—266. — doi: 10.1029/RS008i004p00263
8. Eckner A. Algorithms for Unevenly Spaced Time Series: Moving Averages and Other Rolling Operators // Working Paper. — 2017. — 14 p.
9. Eckner A. A Note on Trend and Seasonality Estimation for Unevenly Spaced Time Series // Working Paper. — 2018. — 8 p.
10. Gross S. H., Reber C. A., Huang F. T. Large-scale waves in the thermosphere observed by the AE-C satellite // Trans. Geosci. and Remote sensing. — 1984. — GE-22, N 4. — P. 340—351.
11. Hedin A. E., Mayr H. G. Characteristics of Wavelike Fluctuations in Dynamics Explorer Neutral Composition Data // J. Geophys. Res. — 1987. — 92(A10). — P. 11159—11172.
12. Huang N. E., Wu Z. A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies // Revs Geophys. — 2008. — 46, N 2. — 23 p. — doi: 10.1029/2007rg000228
13. Innis J. L., Conde M. Characterization of acoustic-gravity waves in the upper thermosphere using Dynamics Explorer 2 Wind and Temperature Spectrometer (WATS)

- and Neutral Atmosphere Composition Spectrometer (NACS) data // J. Geophys. Res. — 2002. — 107 (A12). — P. 1418—1439. — doi:10.1029/2002JA009370
14. Kramer H. J. Observation of the Earth and Its Environment: 4th edit. — Springer, 2002. — 1514 p., 522 illustrations, 857 tables.
 15. Rice C. J., Carter V. L., LaValle S. R., Chater W. T., Jones D. A., King C. G., Nelson D. F. Atmosphere Explorer pressure measurements: Ion gauge and capacitance manometer // Radio Sci. — 1973. — 8, N 4. — P. 305—314. — doi: 10.1029/RS008i004p00305
 16. Spencer N. W., Niemann H. B., Carignan G. R. The neutral-atmosphere temperature instrument // Radio Sci. — 1973. — 8, N 4. — P. 287—296. — doi: 10.1029/RS008i004p00287
 17. Spencer N. W., Wharton L. E., Niemann H. B., Hedin A. E., Carignan G. R., Maurer J. C. The Dynamics Explorer Wind and Temperature Spectrometer // Space Sci. Instrum. — 1981. — 5. — P. 417—428.

Стаття надійшла до редакції 04.09.2018

REFERENCES

1. Lazorenko, O., Chernogor, L. (2009) Ultra-wideband signals and processes: Monograph. *Kharkiv: V. Karazin KhNU* [in Russian].
2. Lyons R. G. (2004) Understanding digital signal processing. Prentice Hall, 2 edition [in English].
3. Skorokhod T. V., Lizunov G. V. (2012) Localized packets of acoustic-gravity waves in the ionosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*, 52 (1): 88—93 [in English].
4. Fatkullin, M., Zarutskaya, E., Fatkullina, V. (1990) Global spatial characteristics of medium-scale undulating inhomogeneities at the height of the F region of the ionosphere at different levels of magnetospheric activity. *Moscow, IZMIRAN, preprint 41(926)* [in Russian].
5. Fedorenko, A. (2009) Reproduction of atmospheric gravitational wave characteristics in polar regions based on mass spectrometric satellite measurements. *Radio physics and radio astronomy*, 14(3): 254—265 [in Ukrainian].
6. Chernogor, L. (2009) Radiophysical and geomagnetic effects of missile launches. Monograph. *Kharkiv: V. Karazin KhNU* [in Russian].
7. Dalgarno, A., Hanson, W. B., Spencer, N. W., Schmerling, E. R. (1973) The Atmosphere Explorer mission. *Radio Sci.*, 8(4): 263—266. — doi: 10.1029/RS008i004p00263 [in English]
8. Eckner, A. (2017, April 3) Algorithms for Unevenly Spaced Time Series: Moving Averages and Other Rolling Operators. ECKNER.com, from <http://www.eckner.com/papers/Algorithms%20for%20Unevenly%20Spaced%20Time%20Series.pdf> [in English].
9. Eckner, A. (2018, June 11) A Note on Trend and Seasonality Estimation for Unevenly Spaced Time Series, from <http://www.eckner.com/papers/Trend%20and%20Sea->

- sonality%20Estimation%20for%20Unevenly%20Spaced%20Time%20Series.pdf [in English].
10. Gross S. H., Reber C. A., Huang F. T. (1984) Large-scale waves in the thermosphere observed by the AE-C satellite. *The Transactions of Geoscience and Remote Sensing*, GE-22(4): 340—351 [in English].
 11. Hedin, A. E., Mayr, H. G. (1987) Characteristics of Wavelike Fluctuations in Dynamics Explorer Neutral Composition Data. *J. Geophys. Res.*, **92**(A10): 11159—11172 [in English].
 12. Huang, N. E., Wu, Z. (2008) A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies. *Revs Geophysics*, **46**(2): 23 p. — doi:10.1029/2007rg000228 [in English].
 13. Innis, J. L., Conde, M. (2002) Characterization of acoustic—gravity waves in the upper thermosphere using Dynamics Explorer 2 Wind and Temperature Spectrometer (WATS) and Neutral Atmosphere Composition Spectrometer (NACS) data. *J. Geophys. Res.*, **107**(A12): 1418—1439. — doi:10.1029/2002JA009370 [in English].
 14. Kramer, H. J. (2002) Observation of the Earth and Its Environment: monograph, *Springer* [in English].
 15. Rice, C. J., Carter, V. L., LaValle, S. R., Chater, W. T., Jones, D. A., King, C. G., Nelson D. F. (1973) Atmosphere Explorer pressure measurements: Ion gauge and capacitance manometer. *Radio Sci.*, **8**(4): 305—314. — doi:10.1029/RS008i004p00305 [in English]
 16. Spencer, N. W., Niemann, H. B., Carignan, G. R. (1973) The neutral-atmosphere temperature instrument. *Radio Sci.*, **8**(4): 287—296. — doi:10.1029/RS008i004p00287 [in English]
 17. Spencer, N. W., Wharton, L. E., Niemann, H. B., Hedin, A. E., Carignan, G. R., Maurer, J. C. (1981) The Dynamics Explorer Wind and Temperature Spectrometer. *Space Sci. Instrumentation*, **5**: 417—428 [in English].

Received 04.09.2018

Г. В. Лізунов, Т. В. Скороход

Інститут космічних досліджень
Національної академії наук України і Державного
космічного агентства України, Київ, Україна

ПРО СЕЛЕКЦІЮ ХВИЛЬОВИХ ЗБУРЕНЬ
НА ФОНІ ТРЕНДІВ У ДАНИХ СУПУТНИКОВИХ
СПОСТЕРЕЖЕНЬ ТЕРМОСФЕРИ

Реєстрація хвильових процесів в атмосфері/іоносфері стикається зі складністю розпізнавання хвильових збурень на фоні потужних низькочастотних трендів атмосферних/іоносферних параметрів. Загальноприйнятим підходом до виділення хвильових збурень в таких умовах являється вилучення тренда з вихідного ряду даних. Але різні методи апроксимації тренду, які використовують різні дослідники, породжують на виході різні про-

філі хвиль. Особливо помітно відмінності проявляються у спектральній області, в якій, в залежності від методу вписування тренду, підсилюються або пригнічуються різні частотні складові хвильового процесу. Метою роботи була побудова коректного методу декомпозиції сигналу на тренд і хвильовий процес для випадку, коли тренд та хвиля розділені між собою в частотній області (що характерно, частково, для акустичних і гравітаційних типів хвиль в термосфері Землі). Методи дослідження — цифрова обробка сигналів і спектральний аналіз. У роботі розвинуто фізичні підходи та математичний апарат обробки даних. Верифікацію методу було проведено на модельних наборах даних. Вперше поставлено та розв'язано задачу оцінки похибки, яку процедура декомпозиції сигналу вносить до характеристики хвилі. З цією метою аналіз похибки було перенесено з просторово-часової області до спектральної. В області масштабів атмосферних акустичних і гравітаційних хвиль похибка роздільності спектру хвиль складає 1...5 %. Вказана похибка виникає з перших принципів (оцінка частоти на кінцевому інтервалі накопичення даних) і не може бути усунена за рахунок «більш якісної» обробки даних. Виявлена природа складності декомпозиції сигналу на тренд і хвилю, яка обумовлена розтіканням спектру тренду — артефакту цифрової обробки сигналу. Ключем до виділення хвильових збурень являється подвійна фільтрація даних. На першому етапі відбувається грубе виключення тренду, що має за мету усунення перекриття спектрів тренду та хвилі за умови невнесення спотворень в діапазон частот корисного сигналу. На другому етапі залишковий ряд даних пропускається через ідеальний фільтр, налаштований на смугу частот хвильового процесу. Після відповідної адаптації метод обробки даних, розвинутий в роботі, може бути використаний до аналізу дистанційних спостережень іоносфери та до аналізу даних інших областей досліджень.

Ключові слова: хвильові процеси, верхня атмосфера, космічний експеримент, цифрова обробка сигналів, спектральний аналіз.

G. V. Lizunov, T. V. Skorokhod

Space Research Institute of the National Academy
of Sciences of Ukraine and the State Space Agency
of Ukraine, Kyiv, Ukraine

SELECTION OF WAVE DISTURBANCES AGAINST
THE BACKGROUND OF TRENDS IN THE DATA
OF THERMOSPHERE SATELLITE OBSERVATIONS

Registration of the wave processes in atmosphere/ionosphere is linked with the difficulty of recognizing the wave disturbances against the background of powerful low-frequency trends of atmospheric/ionospheric parameters. The conventional approach to the selection of a wave under such conditions is an exclusion of a trend from original data series.

Different groups of authors use various methods of trend approximation that causes different wave profiles at the output. Especially noticeable differences appear in the spectral domain, in which various spectral components of the wave process are amplified or suppressed depending on the method of trend fitting. The goal of present work was to develop a correct method for decomposing signal on a trend and wave process for the case when the trend and the wave are separated in the frequency domain (which is typical, in particular, for acoustic and gravity waves in the Earth's thermosphere). Used research methods were the digital signal processing and spectral analysis. Physical approaches and mathematical methods for data processing were developed. Verification of methods was performed on the model data sets. The problem of estimation of the error inserted to wave characteristic by data decomposition procedure was formulated and solved for the first time. For this purpose, the error analysis was transferred from the spatial-temporal domain to the spectral one. On atmospheric acoustic and gravity waves scales the error of the wave

spectrum resolution is 1–5 %. This error arises from the basic principles of frequency estimation on finite data interval and could not be eliminated due to “more thorough” data processing. The nature of difficulty of signal decomposition on the trend and the wave was revealed; it is caused by the trend spectrum spreading that is an artifact of digital signal processing. The solution of the problem of wave disturbance selection was realized using dual data filtering. At the first stage, a rough exclusion of the trend was done. This stage is aimed at the elimination of trend and wave spectrum overlapping upon the condition that algorithm of trend exclusion doesn't distort the frequency range of the useful signal. At the second stage, the residual data series were passed through an ideal filter tuned to the frequency band of the wave process. After appropriate adaptation, the developed data processing method could be applied to the analysis of remote observations of the ionosphere and in other data mining areas.

Keywords: wave processes, upper atmosphere, space experiment, digital signal processing, spectral analysis