

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**  
Научный совет РАН по комплексной проблеме «Распространение радиоволн»  
Научный совет РАН по комплексной проблеме «Физика солнечно-земных связей»  
Институт Радиотехники и электроники РАН

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Марийский государственный технический университет

Российский фонд фундаментальных исследований  
Национальный комитет URSI  
Российская секция IEEE  
Объединенное физическое общество Российской Федерации  
Правительство Республики Марий Эл

# **РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

**СБОРНИК ДОКЛАДОВ**

**XXI  
ВСЕРОССИЙСКАЯ  
НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

25-27 мая 2005 г.

**ТОМ 2**

Йошкар-Ола  
2005

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА В ЗАДАЧАХ ФИЗИКИ ГЕОКОСМОСА

О.В. ЛАЗОРЕНКО<sup>1</sup>, С.В. ЛАЗОРЕНКО<sup>2</sup>, Л.Ф. ЧЕРНОГОР<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Харьковский национальный университет радиозлектроники,  
пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина*

<sup>2</sup>*Международный Славянский университет,  
ул. Отакара Яроша, 9А, г. Харьков, Украина*

<sup>3</sup>*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,  
пл. Свободы, 4, г. Харьков, Украина,  
E-mail: [Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua](mailto:Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua)*

Вейвлет-анализ и анализ Фурье совместно применены для решения задач в области физики геосмоса. С их помощью проведено изучение характера временных вариаций чисел Вольфа (1749 – 2004 гг.),  $D_{st}$ -индекса (1957 по 2001 гг.) и сигналов магнитометра – флюксметра ХНУ имени В. Н. Каразина (1999 – 2003 гг.). Вейвлет-анализ представлен непрерывным вейвлет-преобразованием, а традиционный Фурье-анализ – динамическими спектрами. Оценены параметры возмущений, возникающих в околоземном и космическом пространствах. Продемонстрирована высокая эффективность вейвлет-анализа. Отмечена взаимная дополняемость Фурье- и вейвлет-анализов.

O.V. LAZORENKO, S.V. LAZORENKO, L.F. CHERNOGOR

Wavelet analysis and Fourier analysis for solving of the problems of geospace physics were applied. With using of those methods the peculiarities of the time-domain variations of the sunspot numbers (1749 – 2004),  $D_{st}$ -indexes (1957 – 2001) and Karazin Kharkov National University magnetometer – fluxmeter signals (1999 – 2003). The wavelet analysis is represented by the continuous wavelet transform and the Fourier analysis is represented by the dynamical Fourier spectra. The parameters of the disturbances appearing in the near-to-Earth space were estimated. High efficiency of the wavelet analysis was shown. Cross complementability between Fourier analysis and wavelet analysis was noted.

### Введение

В задачах физики геосмоса вейвлет-анализ (см., например, [1 – 4]) используется сравнительно недавно. А потому имеется мало работ, где применялось вейвлет-преобразование (см., например, [10 – 18]), и этим определяется актуальность предлагаемых исследований.

**Цель работы** состоит в одновременном проведении непрерывного вейвлет-анализа и одномерного и двумерного (динамического) Фурье-анализа временных вариаций чисел Вольфа,  $D_{st}$ -индекса,  $H$ - и  $D$ -компонент магнитного поля Земли.

### Исходные данные

Для проведения исследований нами были взяты следующие экспериментальные данные. Во-первых, временной ряд чисел Вольфа с 1749 по 2004 г., которые, как известно, характеризуют солнечную активность (шаг измерений  $T_0 = 1$  месяц). Во-вторых, временной ряд  $D_{st}$ -индекса с 1957 по 2001 г. (шаг измерений  $T_0 = 1$ ч). Его вариации характеризуют магнитную активность и, в первую очередь, параметры кольцевого тока. В-третьих, временные зависимости  $H$ - и  $D$ -компонент магнитного поля Земли, полученные с помощью магнитометра-флюксметра Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина с 1999 по 2003 г. (шаг измерений  $T_0 = 0,5$  с).

### Методы анализа

В отличие от динамического преобразования Фурье, вейвлет-преобразование имеет адаптивное частотно-временное окно, которое оказывается достаточно узким во времени (по параметру  $b$ ) при малых  $a$  (что соответствует большим частотам  $\omega$ ) и широким для больших  $a$  (что соответствует малым  $\omega$ ). Непрерывное вейвлет-преобразование в работе проводилось с помощью пакета Wavelet Toolbox 2.2 из состава СКМ MATLAB 6.5.

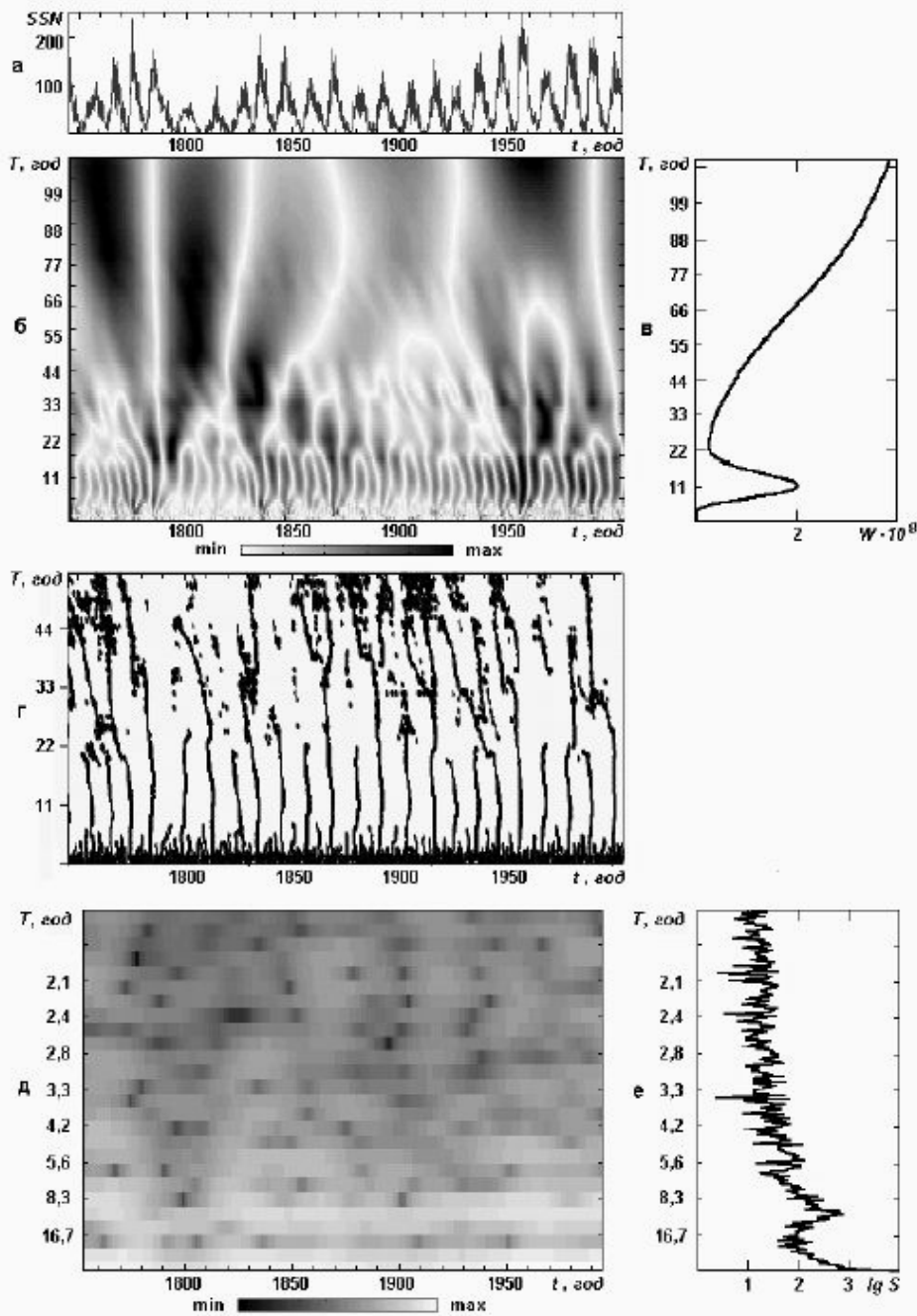


Рис.1. Анализ чисел Вольфа (1749 – 2004 гг.): а – числа Вольфа во временной области, б – непрерывный вейвлет-спектр, полученный с использованием вейвлета db4, в – скалограмма, г – скелетон, д – динамический Фурье-спектр, е – одномерный Фурье-спектр

Кроме анализа вейвлет-спектров  $W(a,b)$ , также полезным оказывается рассмотрение скелетонов и скалограмм (см., например, [1 – 4]). Скелетоном, как известно, называется двумерная картина линий, соединяющих отдельно локальные максимумы и локальные минимумы вейвлет-спектра  $W(a,b)$ . Для практического анализа скелетонов полезны характерные примеры, приведенные в работе [1].

Локальные максимумы на скалограмме отвечают колебаниям, вносящим наибольший вклад в исследуемый процесс. Как правило, изучение скалограммы дополняет вейвлет-спектр.

Таким образом, при анализе каждого заданного временного ряда предлагается на одном рисунке последовательно располагать сам исследуемый ряд  $s(t)$  во временной области, его

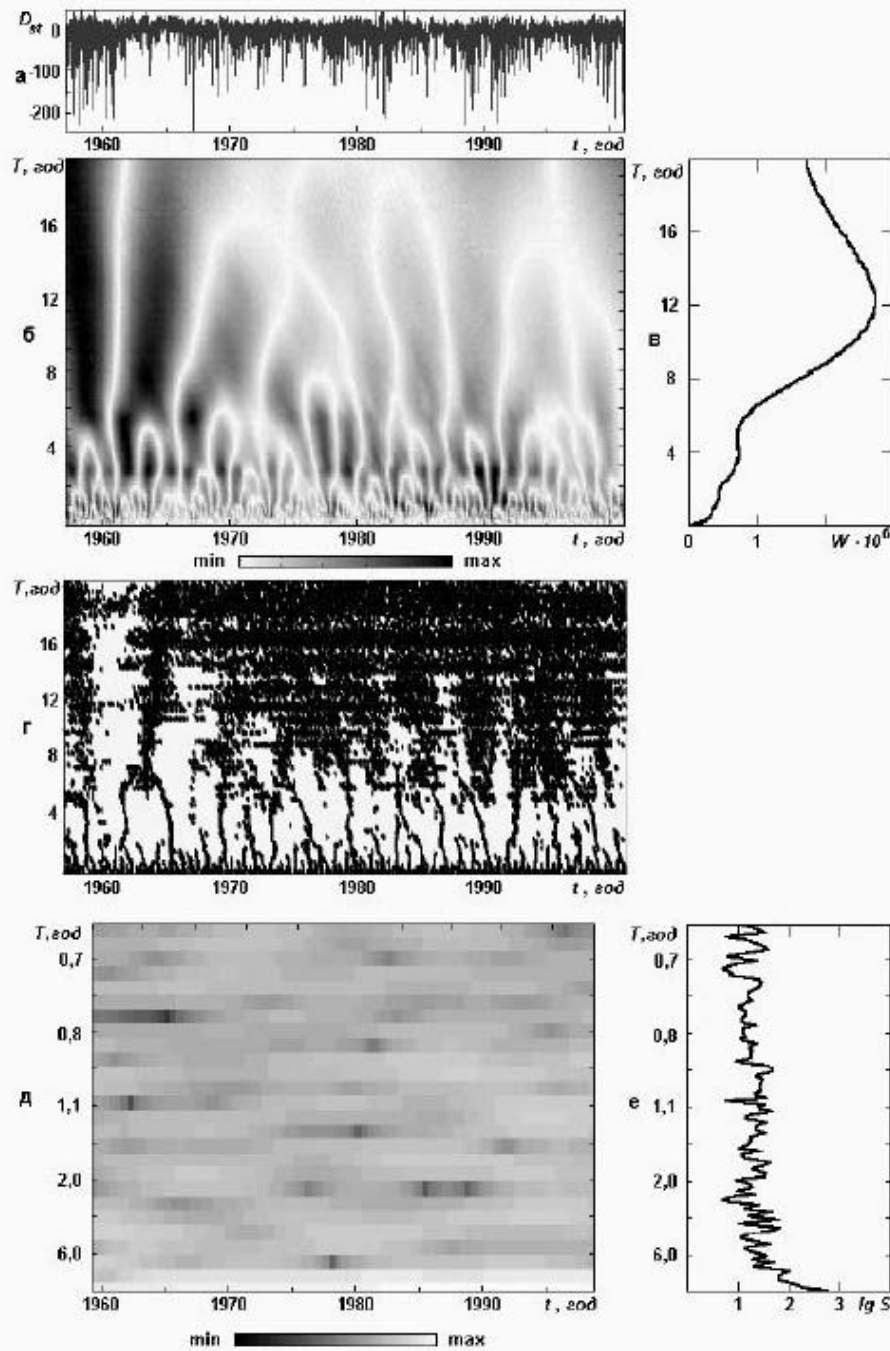


Рис.2. Анализ  $D_{st}$ -индекса (1957 – 2001 гг.): а –  $D_{st}$ -индекс во временной области, б – непрерывный вейвлет-спектр, полученный с использованием вейвлета db4, в – скалограмма, г – скелетон, д – динамический Фурье-спектр, е – одномерный Фурье-спектр

вейвлет-спектр  $W(a,b)$ , скалограмму  $W(a)$ , скелетон, одномерный  $\dot{S}(\omega)$  и двумерный  $\dot{S}(\omega, \tau)$  Фурье-спектры. Это позволит сочетать преимущества как вейвлет-, так и Фурье-анализа. Следует также упомянуть, что для проведения непрерывного вейвлет-преобразования использовались вейвлет Добеши четвертого порядка (db4). Для удобства анализа в полученных  $\dot{S}(\omega)$  и  $\dot{S}(\omega, \tau)$  частота  $\omega$  заменялась на соответствующий период  $T = 2\pi/\omega$ , а величина  $a$  в  $W(a,b)$  и  $W(a)$  в – на  $T = 1,4aT_0$  (последнее справедливо для вейвлета db4).

### Результаты анализа

Результаты анализа временного ряда чисел Вольфа приведены на рис. 1. Как и следовало ожидать, четко проявили себя возмущения с периодами  $T \approx 11$  лет и, по-видимому, с  $T \approx 100$  лет. Особенно хорошо виден одиннадцатилетний цикл на скалограмме (рис. 1, в) (максимум  $W(T)$ ) и скелетоне (рис. 1, г) (серия вертикальных полос, середина которых приходится примерно на  $T \approx 11$  лет). На рис. 1, д и рис. 1, е также хорошо наблюдаются оба характерных периода колебаний. Однако временная локализация на рис. 1, д просматривается хуже. О периоде  $T \approx 100$  лет, как отмечали авторы работы [10], где приводился только вейвлет-спектр ряда чисел Вольфа, с полной уверенностью говорить нельзя, поскольку длина ряда наблюдений (256 лет) недостаточна. Судя по характерному виду вейвлет-спектра (рис. 1, б) и скелетона (рис. 1, г) временной ряд чисел Вольфа носит фрактальный характер, о чем свидетельствует древовидная структура скелетона.

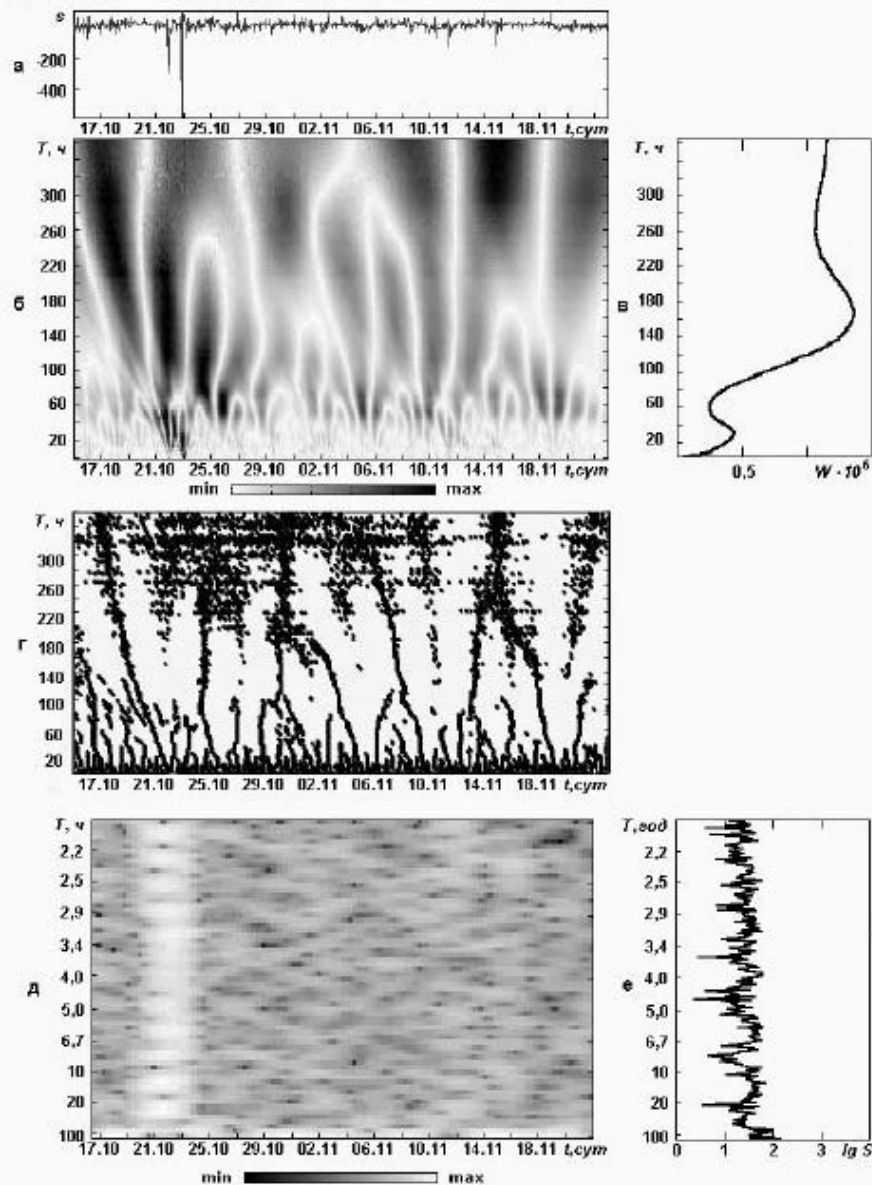


Рис.3. Анализ  $H$ -компоненты магнитного поля (15.10 – 22.11.1999 г.): а –  $H$ -компонента магнитного поля во временной области, б – непрерывный вейвлет-спектр, полученный с использованием вейвлета db4, в – скалограмма, г – скелетон, д – динамический Фурье-спектр, е – одномерный Фурье-спектр

Результаты анализа временного ряда  $D_{st}$ -индекса приведены на рис. 2. Скалограмма

(рис. 2, в) показывает наличие процессов с периодами  $T \approx 11-12$  лет,  $T \approx 3-4$  года, а скелетон (рис. 2, г) – еще и процесса с  $T \approx 1$  года. Первый и второй процессы заметны на рис. 2, д и рис. 2, е. О фрактальности рассматриваемого временного ряда свидетельствуют характерные древовидные структуры на рис. 2, б и рис. 2, г.

На рис. 3 показаны результаты анализа временных зависимостей  $H$ -компоненты (для  $D$ -компоненты результаты подобны) магнитного поля Земли с 15.10.1999 г. по 22.11.1999 г. Установлено, что для  $H$ -компоненты выражены колебания с периодами  $T \approx 24$  ч,  $T \approx 150-170$  ч (рис. 3, в, г). Последний из них также заметен на рис. 3, д, е. На спектрах Фурье эти периоды колебаний практически не заметны. Временные ряды обеих компонент имеют фрактальный характер. Для сравнения с временными зависимостями магнитного поля проведен также анализ вариаций  $D_{st}$ -индекса в тот же временной интервал. Установлено, что наблюдаются колебания с характерными периодами  $T \approx 6-10$  ч и  $T \approx 30-60$  ч.

#### Выводы

1. Вейвлет-анализ является эффективным методом анализа временных рядов данных в различных областях науки и техники, в частности, при решении задач физики геокосмоса.
2. При использовании вейвлет-анализа в виде непрерывного вейвлет-преобразования полезно проводить не только качественный анализ вейвлет-спектра как такового, но и других характеристик, получаемых на его основе (скелетон, скалограмма и т. п.).
3. Вейвлет-анализ удобно проводить параллельно с одномерным и двумерным (динамическим) преобразованием Фурье, поскольку оба этих метода хорошо дополняют друг друга.
4. Временные вариации чисел Вольфа,  $D_{st}$ -индекса,  $H$ - и  $D$ -компонент магнитного поля Земли, описывающие состояние околоземного космического пространства, имеют фрактальную структуру. Это, как и следовало ожидать, подтверждает тот факт, что процессы в геокосмосе часто носят фрактальный характер.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Астафьева Н. М. Вейвлет анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996, т. 166, № 11, с. 1115 – 1170.
2. Дремин И. М., Иванов О. В., Нечитайло В. А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. 2001, т. 171, № 5, с. 465 – 561.
3. Кравченко В. Ф., Рвачев В. А. «Wavelet»-системы и их применение в обработке сигналов // Зарубежная радиоэлектроника. 1996, № 4, с. 3 – 20.
4. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории – к практике. М.: СОЛОН-Р, 2002.
5. Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Применение вейвлет-анализа к задаче обнаружения сверхширокополосных сигналов на фоне помех // Радиофизика и радиоастрономия. 2002, т. 7, № 1, с. 46 – 63.
6. Chernogor L. F., Lazorenko O.V., Lazorenko S.V. Wavelet Analysis and Ultra-wideband signals // Radio Physics and Radio Astronomy. 2002, v. 7, № 4, p. 471 – 474.
7. Гармаш К. П., Лазоренко С. В., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Флуктуации электромагнитного поля Земли во время самой большой геокосмической бури 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия. 2003, т. 8, № 3, с. 253 – 264.
8. Григоренко Е. И., Лазоренко С. В., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопровождающие вспышку на Солнце и сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2003, т. 43, № 6, с. 770 – 787.
9. Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Применение вейвлет-анализа в задачах космической физики и космической радиофизики // Космічна наука і технологія. ДОДАТОК. 2003, т. 9, № 2, с. 91 – 96.
10. Frick P., Galyagin D., Hoyt D., Nesme-Ribes E., Shatten K., Zakharov V. Wavelet analysis of solar activity recorded by sunspot groups // Astronomy and Astrophysics. 1997, v.328, p.670 – 687.
11. Рожной А. А., Клейменова Н. Г., Козырева О. В., Молчанов О. А., Соловьева М. С. Ночные среднеширотные вариации параметров ДВ (40 кГц) сигналов и геомагнитные пульсации Pi3 // Геомагнетизм и аэронавигация. 2003, т. 43, № 4, с.553 – 560.
12. Безверхий В. А. Развитие метода вейвлет-преобразования для анализа геофизических данных // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 2001, т. 37, № 5, с. 630 – 635.
13. Ротанова Н. М., Бондарь Т. Н., Иванов В. В. Вейвлет-анализ вековых геомагнитных вариаций // Геомагнетизм и аэронавигация. 2004, т. 44, № 2, с.276 – 287.