

# ЗАГАДКА ЦУНАМИ: ЗЕМНЫХ И КОСМИЧЕСКИХ



L.A.

*В житейском море зыбь морская  
Меня то крутит, то бросает.  
Вздыхаясь, падают валы  
На плечи грешной головы.  
Подхвачен вихрем утлый челн –  
То вверх, то вниз  
По воле волн.  
Миг ... и любви «девятый вал»  
Вдруг неожиданно поднял  
Над бездною ревущих волн,  
Понес вперед ...  
Надеждой полн,  
Взывая к звездам,  
Им кричу,  
Раскинув руки,  
И ... лечу ...*

**В. И. Козлов**

## КРАХ ПАРАДИГМЫ «ЛИНЕЙНОГО МИРА»

Казалось бы, что может быть общего между печально известной волной цунами, загадочной одиночной «волной-убийцей» в океане, известной также как «девятый вал», с одной стороны, и гелиосферной бурей и... 11-летним циклом, с другой? По мнению автора, объединяет их общность происхождения. Природа тех и других связана с проявлением нелинейности явлений, которая не является досадным исключением из линейного, как представлялось, характера законов природы.

Наиболее сложным периодом в науке является этап смены научной парадигмы – господствующих в данное время научных представлений о мире или характере физических зако-

нов. Раскрытие загадки волн цунами и одиночной океанской «волны-монстра» неожиданно для многих оказалось связанным как раз со сменой парадигмы «линейности», или «принципа суперпозиции», в науке.

Во всех *линейных* моделях скорость распространения волны в воде определяется характеристикой среды – глубиной водоема и постоянной ускорения свободного падения. Но глубина водоема обычно различна, и значит, скорость волны (которая пропорциональна *локальной* глубине водоема) выше на гребне и ниже во впадине. Поэтому гребень опережает впадину – происходит укручение профиля волны и ее последующее опрокидывание.

С другой стороны, известно, что скорость распространения волны



*Валерий Игнатьевич Козлов, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории теории космической плазмы Института космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН.*

зависит от ее длины – явление *дисперсии*. Высшие гармоники, которые возникают при *нелинейном искажении* профиля волны, за счет дисперсии будут либо обгонять основную волну, либо отставать от нее в зависимости от того, растёт или убывает групповая скорость с увеличением волнового числа (величина, обратная длине волны). Вследствие дисперсии исходная волна «*расползается*» на отдельные волновые пакеты еще до ее опрокидывания. В случае же компенсации нелинейного укручения дисперсионным расплыванием возможна реализация *стационарной* бегущей волны, то есть волны, профиль которой не изменяется со временем. Такая волна и называется **солитон**ом (от английского «solitary wave» – одиночная волна).

### ОТКРЫТИЕ ЭКЗОТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ – СОЛИТОНА

Первым наблюдал и описал солитон шотландский инженер викторианской эпохи Джон Скотт Рассел. В 1834 г. он занимался изучением волн, вызванных движением по каналу баржи. В одном из экспериментов баржа неожиданно остановилась, а масса воды, которую она привела в движение, собралась у носа судна и ... оторвавшись от него, покатила по каналу с большой скоростью в виде уединенного возвышения, не меняющего своей формы и не снижающего скорости. На протяжении всей жизни Рассел неоднократно возвращался к результатам этого эксперимента, поскольку верил, что открытая им уединенная волна должна выражать общую закономерность многих процессов в природе. К сожалению, работа Рассела, опубликованная лишь через 10 лет (1844 г.), вызвала неоднозначную реакцию в научной среде. На континенте она осталась незамеченной, а в Англии подверглась жесточайшей критике. Более того, именитые современники Рассела сомневались в самом факте существования подобных волн [1].

Лишь через 30 лет Буссинеск и Рэлей независимо друг от друга нашли аналитическую формулу для «волны возвышения» и вычислили скорость ее распространения, которая *зависела от амплитуды*. Еще через 60 лет Кортевег и де Вриз, используя уравнения гидродинамики, получили нелинейное уравнение для волн, амплитуда которых много меньше, а длина много больше глубины бассейна:

$$u_t + 6 \cdot u \cdot u_x + u_{xxx} = 0,$$

где индексы  $t$  и  $x$  при скорости  $u$  означают соответствующие производные. Оказалось, что решение этого уравнения имеет вид гиперболического секанса (рис. 1) и является уединенной волной, которую Рассел наблюдал еще в 1834 г.

Драматизм ситуации, связанной с открытием Расселом уединенной волны, можно представить по высказыванию профессора Н.А. Кудряшова: «*В настоящее время кажется странным, что открытие Рассела и его последующее подтверждение в работе Кортевега и де Вриза не получили заметного резонанса в науке. Эти работы оказались забытыми почти на 70 лет. Один из авторов уравнения, Д.Д. Кортевег, прожил долгую жизнь и был известным ученым. Но когда в 1945 году научная общественность отмечала его 100-летний юбилей, то в списке лучших публикаций работа, выполненная им совместно с де Вризом, даже не значилась. Составители списка сочли эту работу Кортевега не*

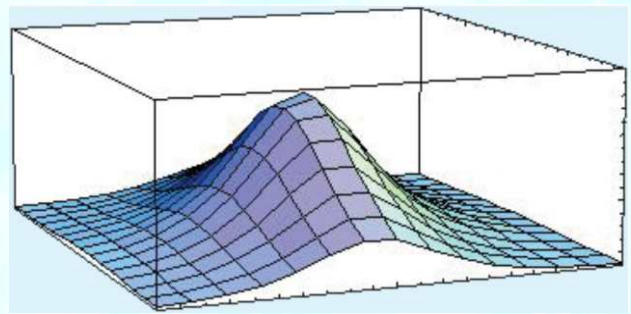


Рис. 1. Решение уравнения Кортевега–де Вриза (солитон Рассела).

заслуживающей внимания. И только спустя еще четверть века именно эта работа стала считаться главным научным достижением Кортевега.

Однако если поразмыслить, то такое невнимание к уединенной волне Рассела становится понятным. Дело в том, что в силу своей специфичности это открытие долгое время считалось довольно частным фактом. В самом деле, в то время физический мир казался линейным, и принцип суперпозиции считался одним из фундаментальных принципов большинства физических теорий. Поэтому никто из исследователей не придавал открытию экзотической волны на воде серьезного значения» [1, стр. 86].

### АНАЛОГИЯ С НЕЛИНЕЙНЫМ ОСЦИЛЛЯТОРОМ

Уравнение Кортевега–де Вриза можно привести к виду известного уравнения для нелинейного осциллятора – материальной точки с условной массой  $\beta$ , движущейся в потенциальной яме  $W(u)$  (рис. 2), причем новая (бегущая) координата, или переменная  $\xi = x - V \cdot t$ , играет роль времени ( $V$  – скорость волн). Существуют различные классы решений этого уравнения:

- 1) квазисинусоидальные колебания с малыми амплитудами (фазовые траектории вблизи состояния равновесия – центр), для них нелинейность почти не сказывается (рис. 3, а);
- 2) нелинейные периодические движения вблизи сепаратрисы, называемые «кноидальными» волнами (рис. 3, б);
- 3) самой сепаратрисной петле соответствует локализованное в пространстве решение в виде одиночного возвышения, или уединенной волны – солитона, с максимальной скоростью или амплитудой  $3V$  (рис. 3, в).

Солитон имеет бесконечные «хвосты» по краям, поскольку время достижения волной состояния равновесия вблизи «седла» (в начале координат) очень велико. В такое состояние система входит с предельно малой скоростью, то есть бесконечно долго. На языке осцилляторной модели сказанное означает, что на графике потенциальной энергии точка массы  $\beta$  длительное время находится в положении  $u = 0$  (начало координат на рис. 2, 3). Затем она скатывается в потенциальную яму  $W(u)$ , достигает максимального значения скорости  $u = 3V$ , где  $W(u)$  во второй раз обращается в нуль, отражается от высокого края потенциальной ямы и столь же медленно возвращается снова в положение  $u = 0$  [2].



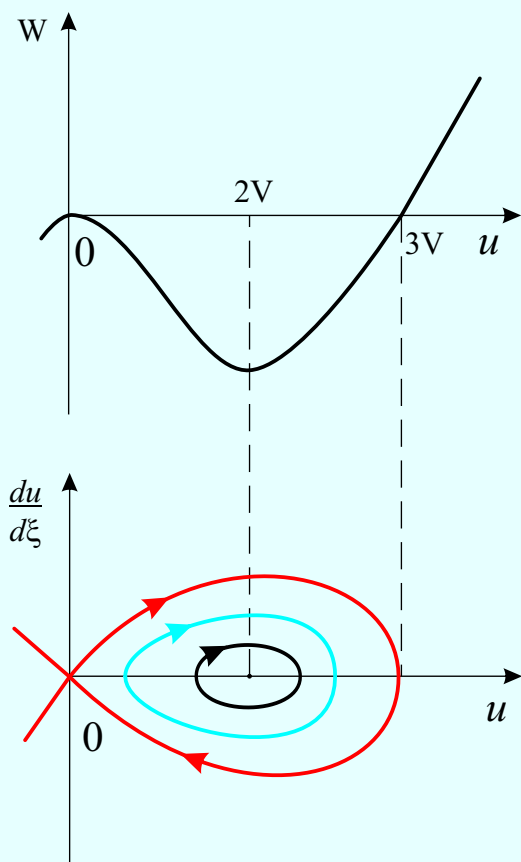


Рис. 2. Потенциальная энергия  $W(u)$  и фазовый портрет стационарных волн. Состояние равновесия  $u = 2V$  – центр. Сепаратрисе соответствует солитон.

**ВСЕ ДОРОГИ ВЕДУТ К ... СОЛИТОНУ**

Для уравнения Кортевега–де Вриза имеет место инвариант  $U_{max} \cdot \Delta^2 = const$ , т.е. произведение величины максимальной скорости (или амплитуды) солитона на квадрат его ширины ( $\Delta$ ) есть величина постоянная. Из этого следует, что **чем выше солитон, тем он уже!** Запомним это. При нормировке (делении) на правую часть этого инварианта удобно ввести безразмерную величину  $\sigma$ , которая пропорциональна максимальной величине скорости  $U_{max}$ . Поэтому величину  $\sigma$  можно условно принять за *параметр нелинейности* волны. Для  $\sigma \ll 1$  возмущение имеет очень малую амплитуду скорости, и его можно считать линейным. При  $\sigma = 1$  нелинейность из-за увеличения амплитуды уравновешивается дисперсией – солитон.

Наибольший интерес представляет случай  $\sigma \gg 1$ . На первой стадии эволюции такого возмущения дисперсия не играет роли, так как его поведение определяется

нелинейностью: доминирует тенденция к укрупнению профиля и последующему его опрокидыванию. Однако при появлении более высоких гармоник в игру вступает дисперсия, которая будет «разводить» возмущения с различными длинами волн. Поэтому по прошествии достаточно большого промежутка времени возмущение должно «рассыпаться» – разбиться на отдельные группы, аналогичные волновым пакетам в линейном случае, движущимся почти с постоянной скоростью. Но все решения, отвечающие бегущим волнам с постоянной скоростью, известны: это периодические (линейные) волны с  $\sigma < 1$  и солитоны с  $\sigma = 1$ . **Никаких других решений нет!** Следовательно, начальный импульс с  $\sigma \gg 1$  должен «рассыпаться» на солитоны и слабо нелинейный пакет. Поэтому в конце концов *останутся практически только солитоны!* [3]. Почему солитоны, то есть частные виды стационарных волн, так интересны? Фактически, по той же причине, что и другие стационарные волны: «... **нестационарные** возмущения довольно широкого класса в процессе распространения асимптотически приближаются к **солитону!**» [4, стр. 308].

**НЕОЖИДАННОЕ ПРОДОЛЖЕНИЕ**

Драматическая история открытия Расселом уединенной волны получила не менее драматическое продолжение. Имеются в виду известные события, относящиеся к парадоксу Ферми–Паста–Улама (ФПУ). В 1952 г. по просьбе знаменитого итальянского физика-теоретика Энрико Ферми изучалась (на ЭВМ) проблема термализации (перераспределения) энергии по модам (гармоникам колебаний) в системе осцилляторов, связанных *нелинейными* пружинами. Ожидалось, что при учете в возвращающей силе квадратичной нелинейной добавки, моды колебаний не будут независимыми, то есть начнется их нелинейное взаимодействие – медленная (по сравнению с периодом мод) перекачка энергии от

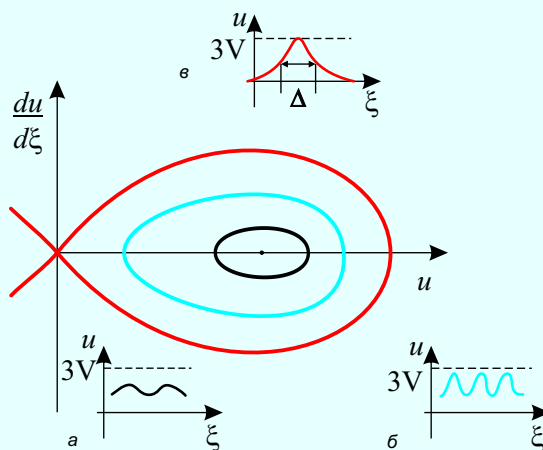
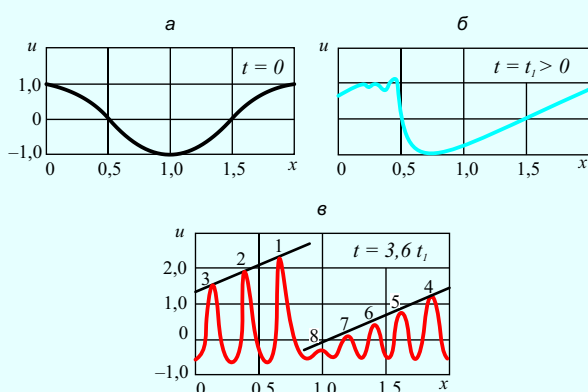


Рис. 3. Различные классы решений уравнения Кортевега–де Вриза и их соответствие фазовому портрету стационарных волн: а – квазисинусоидальные колебания малой амплитуды вблизи состояния равновесия (центр); б – нелинейные периодические «кноидальные» волны; в – солитон, или уединенная волна на сепаратрисе.

моды к моде. Ферми, Паста и Улам предполагали, что энергия в конце концов равномерно распределится между модами – произойдет *термализация* энергии по степеням свободы в полном соответствии со вторым началом термодинамики. Но результат оказался удивительным. *Вместо термализации наблюдался длительно повторяющийся процесс перекачки энергии от самой низкой моды к низким и обратно!* (рис. 4, а, б, в). Парадокс ФПУ был разрешен лишь в 1965 г., когда Мартин Крускал и Норманн Забуски установили *эквивалентность* (в пределе) дискретной системы уравнений связанных осцилляторов Ферми–Паста–Улама и уравнения Кортевега–де Вриза. Вот тут-то Забуски и Крускал обнаружили нечто удивительное, о чем, впрочем, знал Рассел: при взаимодействии два почти одинаковых импульса, казалось, обменивались своими свойствами. Действительно, *передний меньший импульс становился выше и уже, когда к нему подходил передний фронт*



**Рис. 4. Эволюция во времени синусоидального возмущения для уравнения Кортевега–де Вриза (изображен один цикл).**

большого импульса. Большой импульс, в свою очередь, приобретает свойства меньшего (в этом смысле, импульсы больше похожи на частицы). Когда же амплитуды импульсов сильно различались, большой импульс «проходил» сквозь меньший).

### ТАЙНА «ДЕВЯТОГО ВАЛА» РАСКРЫТА?

До 60-х годов прошлого века считалось, что нелинейные уравнения могут иметь только частные решения, удовлетворяющие специально заданным начальным условиям. Однако уравнение Кортевега–де Вриза и в этом случае оказалось в исключительном положении [1]. Это подтверждается историей, связанной с загадкой происхождения таинственного «девятого вала». С незапамятных времен люди наблюдали группы волн на воде. И лишь в 1967 г. было установлено, что простая периодическая волна на глубокой воде *неустойчива и разбивается на группы* (неустойчивость Бенжамена–Фейера). Уравнение, описывающее распространение групп волн на воде было получено

В.Е. Захаровым в 1968 г. Причем, полученное уравнение было уже известно физикам (нелинейное уравнение Шредингера). Однако самое удивительное в том, что оно имеет *решение в виде солитонов!* Правда, солитоны уравнения Шредингера отличаются от солитонов Кортевега–де Вриза тем, что они соответствуют форме *огibaющей* группы волн. Это – так называемый групповой солитон, или «солитон огibaющей» (рис. 5). Он движется со скоростью, отличной от скорости движения самих волн, причем они почти *монохроматичны!* И – внимание! – «... под огibaющей может спрятаться от 14 до 20 волн, причем средняя – самая высокая. В этом – объяснение "девятого вала": самая высокая в группе – седьмая–десятая волна» [2, стр. 94].

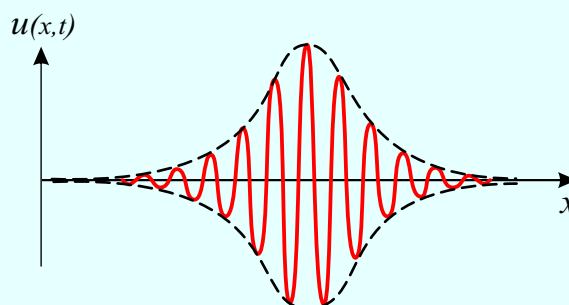
### СОЛИТОННАЯ ПРИРОДА ГЕЛИОСФЕРНОЙ БУРИ И ... 11-ЛЕТНЕГО ЦИКЛА

В предыдущих публикациях автора данной статьи говорилось о введении им в начале восьмидесятых годов нового индекса солнечной активности – индекса мерцаний космических лучей [5–7]. По сути, он является показателем частотного спектра флуктуаций. Показатель спектра, в свою очередь, определяется, как величина наклона линейного тренда огibaющей всех амплитуд гармоник частотного спектра.

Известно, что *амплитуды* всех гармоник идеального случайного сигнала, или «белого шума», в среднем *равны*. Следовательно, наклон линейного тренда огibaющей гармоник идеального случайного сигнала, то есть показатель спектра для «белого шума», равен нулю. Именно такой вид в среднем имеет частотный спектр флуктуаций интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) в изучаемом нами диапазоне периодов их флуктуаций (100–10000 с).

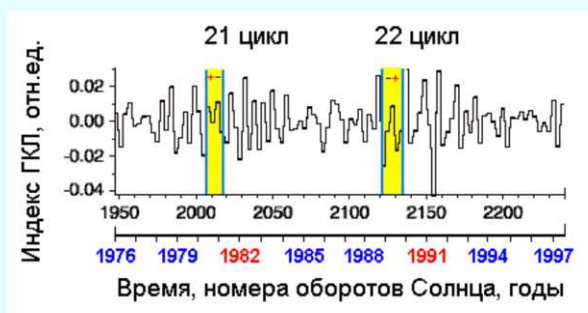
Значимые и систематические изменения показателя частотного спектра флуктуаций космических лучей в возмущенный период мы связываем с модуляцией фонового шумоподобного спектра флуктуаций ГКЛ вариациями межпланетного магнитного поля во время усиления активности Солнца.

Если в традиционной радиотехнике «несущей» является фиксированная радиочастота, подверженная модуляции акустическим сигналом на входе радиопередатчика и демодуляции звукового сигнала на выходе радиоприемника, то в нашем случае мы имеем дело, образно



**Рис. 5. Решение нелинейного уравнения Шредингера – групповой солитон («солитон огibaющей» – пунктирная кривая).**





**Рис. 6. Солитоноподобная тонкая структура двух 11-летних циклов по результатам расчета (по пятиминутным данным) индекса мерцаний полярной станции космических лучей Оулу (Финляндия) за 20 лет (1976–1997 гг.). В данных предварительно исключен низкочастотный тренд, обусловленный 11-летней вариацией.**

говоря, с «хаотической несущей»! Следовательно, необходимо было решить проблему демодуляции, с целью выявления полезного сигнала от солнечного источника. В этом смысле можно сказать, что своеобразный «пульс Солнца» давно уже передается нам через модуляцию шумоподобного фона космического излучения. Оставалось только его услышать.

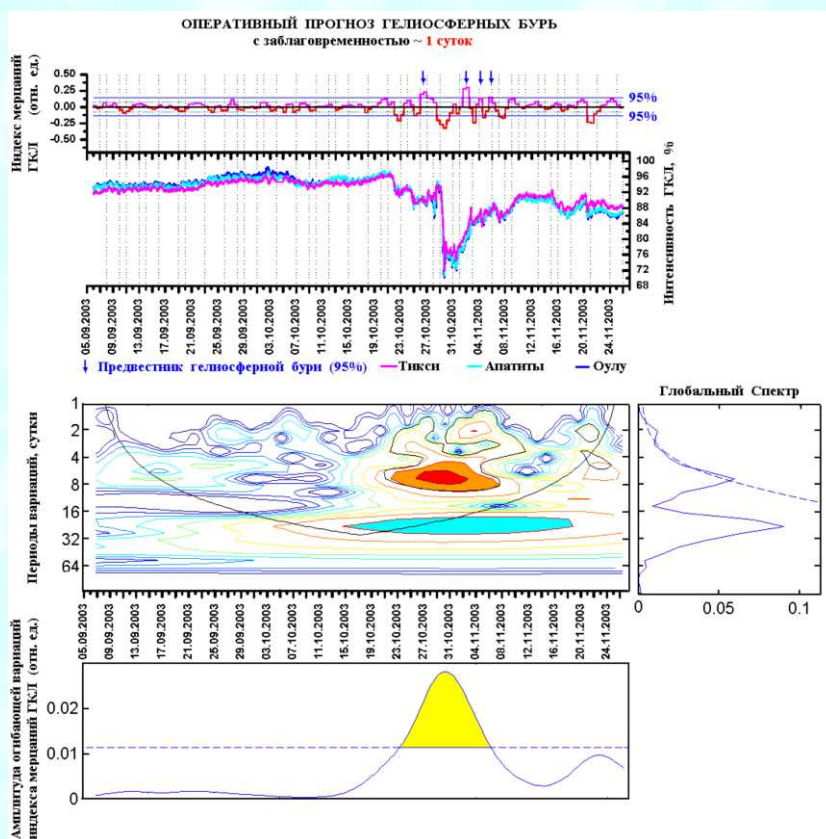
В итоге нами была обнаружена **тонкая структура** 11-летнего цикла – нестационарный переходный колебательный процесс смены знака общего магнитного поля Солнца (рис. 6). При этом установлена обратная зависимость длительности переходного колебательного процесса от его амплитуды. Это означает **неизменность площади** под кривой единичного 11-летнего цикла, то есть наличие инварианта: «амплитуда–длительность» [8–9]. В таком случае уменьшение амплитуды неизбежно влечет за собой увеличение продолжительности солнечного цикла и наоборот.

Нечто похожее было установлено ранее и другими авторами. На существование обратной зависимости между временем достижения максимумов 11-летнего цикла и его амплитуды указывалось ранее Вальдмайером [10]. Обратная зависимость между временем достижения максимума цикла и квадратным корнем из амплитуды цикла выявлена и в недавней работе Э.В. Кононовича [11].

Похожая зависимость характерна для «солитона огибающей» (ши-

рина солитона обратно пропорциональна корню квадратному из его амплитуды). Все это указывает на солитоноподобную природу 11-летнего цикла, обладающую самоподобными, т.е. скейлинговыми или фрактальными свойствами [12–13].

Действительно, на меньших масштабах **самоподобные** или фрактальные свойства обнаруженных осцилляций проявляются в солитоноподобной природе гелиосферного токового слоя в период гелиосферной бури (рис. 7) [14–15]. Как и для солитона, момент регистрации **максимальной** амплитуды вариаций индекса мерцаний приходится на минимальный период вариаций. На это указывает характерный вейвлет-образ гелиосферной бури в космических лучах: в виде своеобразной «летающей тарелки». Это хорошо видно при сопоставлении амплитуды **огибающей** вариаций индекса (в нижней части рисунка) со структурой того же вейвлет-образа: **максимум** амплитуды огибающей приходится на **наименьший период** вариаций, который совпадает с серединой «летающей тарелки».



**Рис. 7. Результаты оперативного прогноза и вейвлет-анализ вариаций индекса мерцаний ГКЛ в октябре – ноябре 2003 г. Двея горизонтальными линиями показан двухсторонний 95%-ный уровень значимости для индекса мерцаний. Значимые положительные значения соответствуют предиктору, отрицательные – диагностике. Ниже – часовые значения интенсивности ГКЛ по данным трех полярных станций космических лучей. Показана также амплитудно-временная диаграмма вариаций (по оси ординат – периоды вариаций в сутках). По оси абсцисс – суточная шкала мирового времени. Внизу – амплитуда огибающей вариаций индекса ГКЛ.**

ЭПИЛОГ

Формирование солитоноподобной структуры в гелиосферном токовом слое является важным с различных точек зрения. Прежде всего, это означает, что нет взаимнооднозначного соответствия между спорадическими (отдельно взятыми) событиями на Солнце и их проявлениями на орбите Земли: гелиосферный токовый слой обладает собственной «передаточной функцией», до неузнаваемости искажающий такой солнечный «сигнал». Таким образом, область между Солнцем и Землей давно уже не является межпланетным пространством, а есть межпланетная среда, точнее – солнечная корона, проявляющая удивительные свойства в периоды экстремальной солнечной активности! Что касается возможной **солитонной** природы 11-летнего цикла, то это может означать, что сама 11-летняя цикличность есть **эфф-фективный** (солитонный) механизм регуляции энергии Солнца, предотвращающий от «перегрева» при критической температуре.

Основные положения данной статьи были доложены ее автором на международном симпозиуме по современным наблюдениям и моделированию в системе «Солнце-Земля». На конференции не обошлось и без интригующих моментов: доклад о солитонной природе 11-летнего цикла [9] был поставлен оргкомитетом симпозиума, вряд ли случайно, перед докладом финских коллег с похожим (по сути) названием: «Гелиосферное магнитное поле: застенчивая балерина, танцующая в темпе вальса» [16]. Как видно, «горячие» финские парни были настолько поражены красотой обнаруженного ими эффекта, что не удержались от возвышенного слога. Нам же удалось не только увидеть удивительную гармонию, но и разгадать природу (солитонную, как мне представляется) явления, наблюдаемого в верхней короне Солнца.

Литература

1. Кудряшов Н.А. *Нелинейные волны и солитоны // Соросовский образовательный журнал.* – 1997. – № 2. – С. 85–91.
2. Трубецков Д.И. *Введение в синергетику. Хаос и структуры.* – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 235 с.
3. Кадомцев Б.Б. *Коллективные явления в плазме.* – М.: Наука, 1988. – 304 с.
4. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. *Введение в теорию колебаний и волн.* – М.: Наука, 1984. – 432 с.

5. Козлов В.И. *Космическая Погода. Мифы и реальность // Наука и техника в Якутии.* – 2002. – № 1(2). – С. 17–20.
6. Козлов В.И. *Горизонты предсказуемости. Очевидное – невероятное // Наука и техника в Якутии.* – 2003. – № 2(5). – С. 11–14.
7. Козлов В.И. *Грядет ли сбой 11-летнего солнечного цикла? // Наука и техника в Якутии.* – 2006. – № 1(10). – С. 51–56.
8. Козлов В.И., Марков В.В. *Вейвлет-образ тонкой структуры 11-летнего цикла по исследованию флуктуаций космических лучей в 20–23 циклах // Геомагнетизм и аэронавигация.* – 2007. – № 1.
9. Kozlov V.I., Markov V.V. *Soliton-similar nature of 11-year solar activity cycle // Abstracts of International Symposium «Recent Observations and Simulations of the Sun-Earth System».* – Varna, Bulgaria, September 17–22. – 2006. – С. 63.
10. Витинский Ю.И. Колецкий М., Ку克林 Г.В. *Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца.* – Москва: Наука, 1986. – 201 с.
11. Кононович Э.В. *Аналитические представления средних вариаций солнечной активности в течение цикла // Геомагнетизм и аэронавигация.* – 2005. – Т. 45. – № 3. – С. 316–323.
12. Козлов В.И. *Масштабная инвариантность динамики флуктуаций космических лучей на геоэффективных фазах солнечного цикла // Геомагнетизм и аэронавигация.* – 1999. – Т. 39. – № 1. – С. 96–99.
13. Козлов В.И. *Оценка скейлинговых свойств динамики флуктуаций космических лучей в цикле солнечной активности // Геомагнетизм и аэронавигация.* – 1999. – Т. 39. – № 1. – С. 100–104.
14. Козлов В.И., Марков В.В. *Вейвлет-образ гелиосферной бури в космических лучах // Геомагнетизм и аэронавигация.* – 2007. – № 1.
15. Kozlov V.I., Markov V.V. *Soliton-similar Image of Heliospheric Storm // Abstracts of International Symposium «Recent Observations and Simulations of the Sun-Earth System».* – Varna, Bulgaria, September 17–22. – 2006. – С. 63.
16. Mursula K. *Heliospheric Magnetic Field: the Bashful Balerina Dancing in Waltz Tempo // Abstracts of International Symposium «Recent Observations and Simulations of the Sun-Earth System».* – Varna, Bulgaria, September 17–22. – 2006. – С. 78 – [<http://www.isroses.org/>].

НОВЫЕ КНИГИ



**Регистрация актов гражданского состояния:** Сборник официальных документов / Управление ЗАГС при Правительстве Республики Саха (Якутия); Отв. за вып. Т. М. Родионова. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. – 312 с.