



## АРИТМИЯ СОЛНЦА ИЛИ... «ФАЗОВАЯ КАТАСТРОФА»?

REU-CANADA

В. И. Козлов



**Валерий Игнатьевич Козлов,**  
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института космических исследований и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера, г. Якутск

*Симметрия симметрии,  
конечно, рознь.  
Они – симметрии, как люди, – разные!  
Суть же в том,  
что НАРУШЕНИЕ симметрии –  
Источник красоты и... разнообразия!*  
В. И. Козлов, 2017 г.

### Введение

Более 10 лет назад в журнале «Наука и техника в Якутии» вышла моя статья «Грядет ли сбой 11-летнего солнечного цикла?» [1]. Достаточно набрать, например, в Google ключевые слова «сбой 11-летнего цикла», как указанная статья будет доступна в Интернете на первой же страничке. В ней была изложена моя гипотеза о возможном предстоящем сбое 11-летней цикличности Солнца и, соответственно, о наступлении глобального минимума активности Солнца с последующим глобальным похолоданием в планетарном масштабе?! С

другой стороны, в то время – середина первого десятилетия 2000-х годов – подавляющее большинство «солнечников», как у нас в России, так и за рубежом, были сторонниками идеи о предстоящем периоде (на рубеже конца первого и начала второго десятилетия 2000-х), как периоде повышенной и даже экстремально высокой солнечной активности. Вопреки ожиданиям большинства учёных, как у нас, так и за рубежом, наступление нового 24 цикла затянулось. В итоге, вместо ожидаемого многими роста активности в 2008 г., заметный рост активности начался лишь на третий год (2011 г.). В настоящее время уже можно констатировать факт, как минимум, *неординарного сбоя* 11-летней цикличности Солнца в текущем 24 цикле. Это подтверждается данными солнечных наблюдений, данными прямых измерений межпланетного магнитного поля и параметров солнечного ветра на космических аппаратах.

*На фото сверху – подсвеченная панорама замёрзшего Ниагарского водопада (2014 г.)*

### 1. Точка бифуркации, или «момент истины»

*...Блажен, кто посетил сей Мир  
в его минуты роковые!*  
Ф. И. Тютчев. 1836 г.

В зависимости от того, окажется ли текущий сбой 11-летней цикличности Солнца *локальным* или *глобальным*, различными будут и последствия: в случае локального сбоя 11-летняя цикличность должна будет восстановиться в предстоящем 25 цикле (2021–2030 гг.). Тогда характер сбоя в 23-24-25 циклах сохранит статус **неординарного**. В случае же глобального сбоя, т. е. не восстановления 11-летней цикличности в 25 цикле, а это будет ясно уже к середине предстоящего десятилетия, характер сбоя 11-летней цикличности в 23-24-25 циклах нужно будет отнести к статусу «**фазовой катастрофы**». Это и будет означать наступление *глобального минимума* активности Солнца в современную эпоху и, как следствие, весьма вероятное... *глобальное похолодание* в планетарном масштабе?! Таким образом, текущая фаза неординарного сбоя 11-летней цикличности в 23-24 циклах, имеющая статус (как минимум) локального сбоя, – это лишь необходимое условие, и только *не восстановление* 11-летней цикличности к середине 25 цикла явится **достаточным** условием смены статуса локального сбоя на глобальный! Тем не менее даже при текущем, по умолчанию – неординарном статусе сбоя 11-летней цикличности, уже имеются признаки наступления глобального минимума активности Солнца в виде замерзающего Ниагарского водопада в течение трёх последних зим (рис. 1) и второй год подряд засыпанной снегом пустыни Сахары (рис. 2).

### 2. Космическое проявление принципа Дао: «Инь-Ян»

*...Исследование горизонтов  
прогнозирования солнечных  
и гелиосферных процессов  
представляется актуальной научной  
и практической задачей.*

**И. С. Веселовский.** Космические исследования. 2004. Т. 42. № 5. С. 505.

Долгосрочный прогноз активности Солнца важен при планировании долгосрочных экспериментов в Космосе и осуществлении длительных полётов человека к Луне и планетам Солнечной системы, которые уже запланированы на ближайшие десятилетия. Без возможности обеспечения долгосрочных прогнозов радиационной обстановки большинство экспериментов в околоземном космическом пространстве и,

прежде всего, пилотируемые дальние перелёты будут обречены.

Уровень солнечной активности и галактический фон космических лучей высоких энергий соотносятся между собой по принципу Дао «Инь-Ян», или известного в квантовой физике «принципа дополнительности» Нильса Бора. Это означает, что в случае затяжного спада активности Солнца будет доминировать радиационный галактический фон, уровень которого находится в *противофазе* с уровнем солнечной активности. И, наоборот, в случае активного Солнца галактический радиационный фон становится существенно ниже. Выходит, что от губительной радиации глубокого Космоса нас защищает не только магнитосфера Земли, но и активное Солнце! Так что ещё неизвестно, что хуже: экстремальная солнечная активность или... её отсутствие.

Сбои 11-летней цикличности типа «фазовой катастрофы» случаются достаточно редко, по меньшей мере, раз в сто лет, как это было, например, в годы



Рис. 1. Застывший Ниагарский водопад (2014–2015 гг.)



Рис. 2. Засыпанная снегом пустыня Сахары (2015–2016 гг.)

глобальных минимумов активности Солнца, известных как минимумы Дальтона и Глайсберга (рис. 3). Подобный спад солнечной активности привёл в 2007–2010 гг. (заштрихованная область на рис. 4) к многолетнему аномальному повышению фона космических лучей. Это первый подобного рода прогноз, который был дан по космическим лучам в 2006 г. [1] и который впоследствии успешно подтвердился.

В случае не восстановления 11-летней цикличности Солнца, а это должно быть известно уже в начале 2025 г. («точка бифуркации»), статус текущего неординарного сбоя 23-24-25 циклов сменится на статус «фазовой катастрофы»?! Это и будет означать наступление глобального минимума активности Солнца, с относительно повышенным радиационным фоном не только в начале цикла с 2018–2021 гг., но и на протяжении ВСЕГО предстоящего 25 цикла (2021–2030 гг.)?!

### 3. Инвариант 11-летнего цикла: «амплитуда – длительность»

Связь между законами *сохранения* и *симметриями* физических законов... до сих пор поражает физиков своей глубиной и красотой ...  
Р. Фейнман, 1968 г.

Каждая смена знака общего магнитного поля Солнца завершается резким и глубоким понижением в интенсивности космических лучей и во введённом параметре флуктуаций космических лучей (сплошная кривая красного цвета на рис. 4: 1972, 1982, 1991, 2003, 2014). 11-летняя вариация и в интенсивности, и в параметре флуктуаций галактических космических лучей выявляется достаточно отчётливо. Обращает на себя внимание появление «низкочастотного дрейфа» периода 11-летней вариации, т. е. *увеличение* длительности «низкого» по амплитуде 23 цикла (рис. 5). Этот важный для дальнейшего результат подтверждает наш вывод, полученный ранее по индексу мерцаний космических лучей [2]. Чем *выше* амплитуда цикла в максимуме, тем *короче* длительность фазы переполюсовки магнитного поля Солнца (соответственно, короче и сам цикл), и, наоборот, чем ниже амплитуда цикла, тем продолжительнее процесс инверсии поля и, соответственно, более продолжителен цикл.

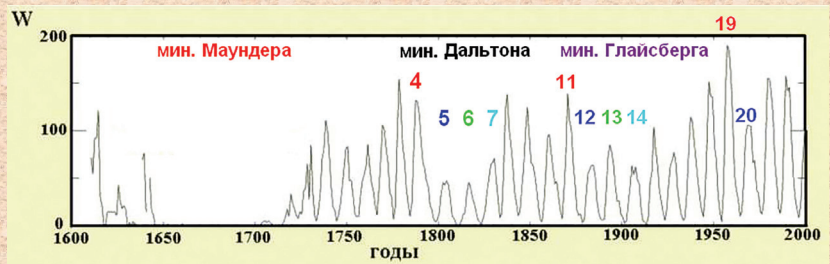


Рис. 3. Глобальные сбои 11-летней цикличности Солнца или глубокие исторические минимумы солнечной активности по данным наблюдений среднегодовых значений чисел Вольфа с 1600 по 2000 гг.

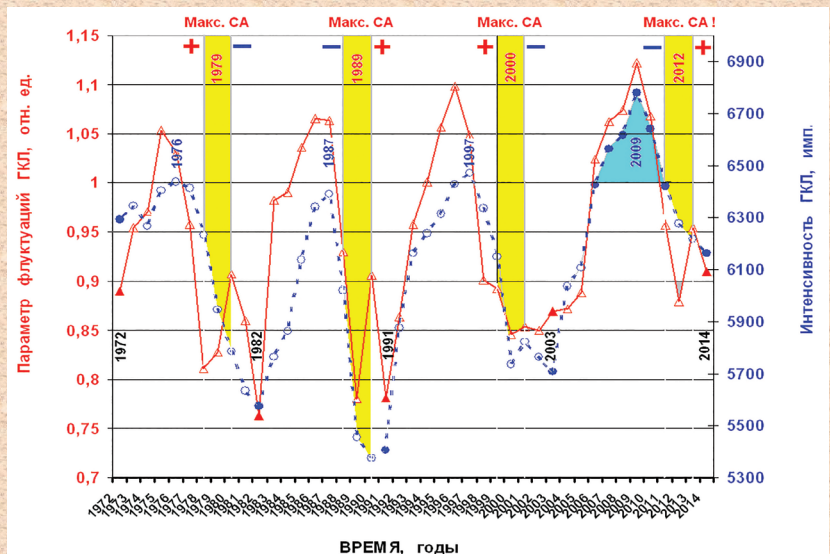
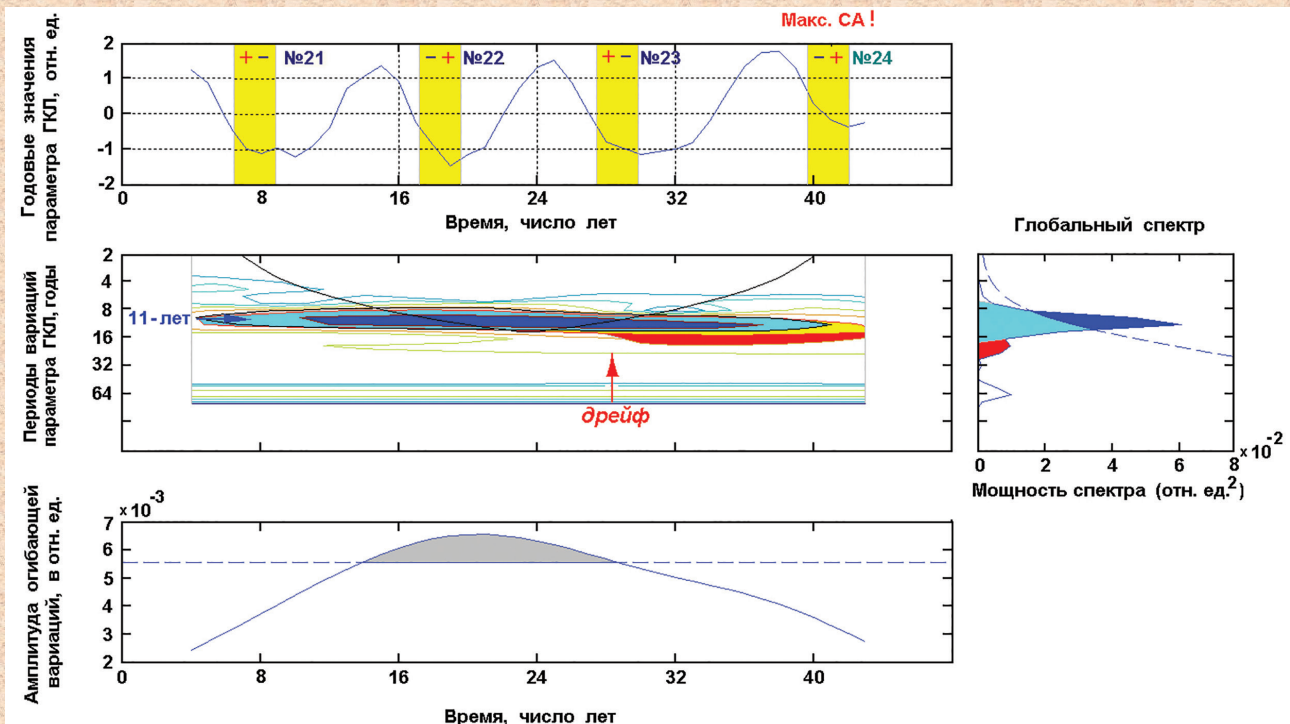


Рис. 4. Точечная кривая, шкала справа – среднегодовые значения интенсивности космических лучей с 1972 по 2014 гг. Сплошная кривая, шкала слева – соответствующие значения параметра флуктуаций, рассчитанного за тот же период (5 неполных циклов – 20–24). Условно показаны периоды смены знака общего магнитного поля Солнца и периоды минимумов и максимумов активности Солнца. Низкие значения параметра флуктуаций означают диагностику возмущённого периода. По оси абсцисс – время: годы и, соответственно, номера оборотов Солнца по системе Бартельса

Увеличения длительности «низкого» по амплитуде 23 цикла следовало ожидать, если предложенная нами гипотеза об инварианте бинарной связи «амплитуда – длительность» 11-летнего цикла [2] действительно имеет место. Сейчас этот вывод подтвердился на новой базе: с использованием параметра флуктуаций космических лучей. Важно заметить, что сам факт увеличения длительности «низкого» по амплитуде 23 цикла является независимым экспериментальным свидетельством в пользу реальности вышеуказанного инварианта, его ожидаемым следствием. Указания на то, что «длина цикла, в свою очередь, отрицательно коррелирует с высотой цикла» появились в недавней работе [3].



**Рис. 5. Сбой 11-летней цикличности: появление низкочастотного дрейфа 11-летней вариации в параметре флуктуаций космических лучей.**

Вверху – временной ход параметра флуктуаций за 43 года, с 1972 по 2014 гг. Ниже – амплитудно-частотно-временная диаграмма эволюции 11-летней вариации за исследуемый период. Справа – глобальный спектр вариаций в целом. Внизу – амплитуда огибающей вариаций. Местоположение 11-летней вариации на диаграмме показано горизонтальной стрелкой слева. Вертикальная стрелка указывает на начало низкочастотного дрейфа периода 23-го цикла. Условно показаны периоды смены знака общего магнитного поля Солнца и, соответственно, номера солнечных циклов

#### 4. Предвестник сбоя цикличности Солнца

*...Здесь любая динамическая система имеет свой уникальный след – фазовый портрет.*

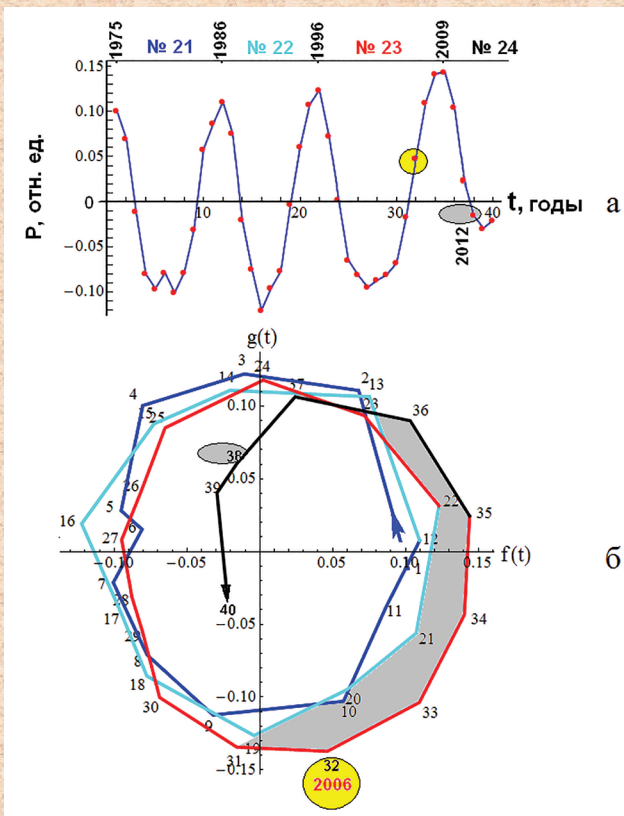
*И среди них встречаются фазовые портреты довольно странные.*

С. Л. Деменок. ФРАКТАЛ. Между мифом и ремеслом. СПб. 2011. 296. С. 142.

Почему так важен факт увеличения длительности 23 цикла? Дело в том, что появление низкочастотной «подложки» в спектре 11-летнего цикла может предшествовать сбою 11-летней цикличности [4]. И наши исследования это подтверждают [5]. В плане изучения природы сбоев 11-летней цикличности особый интерес представляет подход Г. В. Куклина [6], который анализировал сбой солнечных циклов, используя систему Лоренца. Система Лоренца в состоянии описывать различные этапы эволюции динамической системы (Солнца, в нашем случае): от **возникновения** конвекции – появление автоколебаний при **превышении** критического значения температуры – до **исчезновения** автоколебаний при **понижении** температуры.

Следует заметить, что гипотеза о наличии инварианта 11-летнего цикла «амплитуда – длительность» явилась логическим следствием **целостного** подхода к анализу связи вариаций амплитуды и длительности солнечного цикла. Дальнейшее развитие целостного подхода было естественно завершить анализом «фазовых портретов» солнечных циклов на комплексной фазовой плоскости. С этой целью применим метод траекторного анализа колебаний на комплексной фазовой плоскости с использованием аналитического сигнала. Аналитический сигнал является математической моделью исходного сигнала. На комплексной плоскости он отображается вектором, модуль и фазовый угол которого изменяются от аргумента, а проекция сигнала на вещественную ось равна значению исходного сигнала.

«Фазовые портреты» 11-летних циклов приведены на рис. 6. Они рассчитывались по среднегодовым значениям параметра флуктуаций космических лучей. В верхней части рисунка показан временной ход анализируемого параметра. На шкале времени приведены номера циклов. Наибольшую площадь описывает траектория 23 цикла (показана красным цветом). Увеличение площади цикла начинается с 2006 г. (точка на фазовой траектории № 32). *Наибольшая* площадь, замечаемая



**Рис. 6.** «Фазовые портреты» последних 4-х неполных циклов – 21–24 (с 1975 по 2014 гг.), рассчитанные по среднегодовым значениям параметра флуктуаций космических лучей. Вверху – временной ход среднегодовых значений параметра флуктуаций космических лучей. Показаны номера соответствующих циклов. Наибольшую площадь имеет 23 цикл. Наибольшая площадь 23 цикла является предвестником неординарного сбоя 11-летней цикличности, т. е. предвестником «фазовой катастрофы» 24 цикла

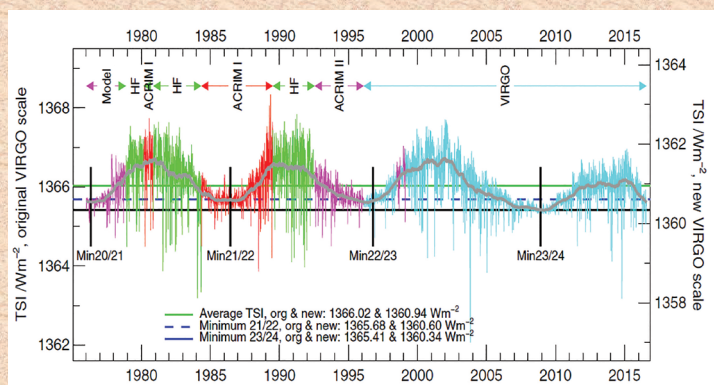
фазовой траекторией, считается признаком аномального цикла перед «фазовой катастрофой» [6], по сути – её предвестником. В итоге на языке «фазовых портретов» получено независимое подтверждение вывода о предвестнике как минимум – неординарного сбоя 11-летней цикличности Солнца в современную эпоху – эпоху «Космической эры».

**5. Инвариант с характерным масштабам 22-летнего цикла**

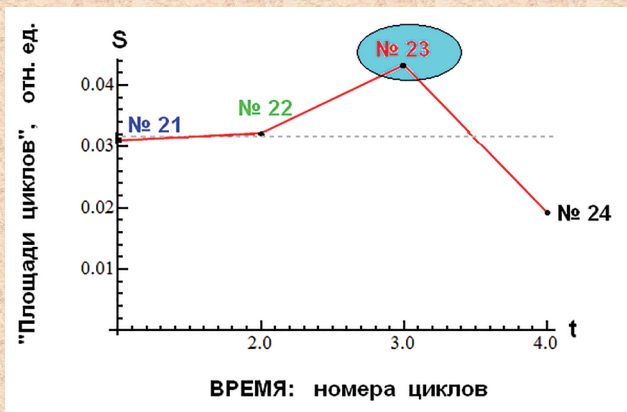
Почему Природа близка к симметрии, почти симметрична? ... объяснение почти полной симметрии таково: Бог создал законы не совсем симметричными, чтобы мы не стали завидовать их совершенству!  
**Р. Фейнман.** Дюжина лекций: шесть попроще и шесть посложнее. М. 2011.

Выше было установлено, что увеличение площади «фазового портрета» солнечного цикла служит предвестником сбоя 11-летней цикличности. Оценку площади заметаемой кривой солнечного цикла можно получить разными способами: по оценке площади заметаемой под кривой временного хода 11-летнего цикла и по оценке площади заметаемой фазовой траекторией на комплексной фазовой плоскости. Физический смысл термина «площади цикла» представляется более прозрачным во втором варианте (площадь, заметаемая фазовой траекторией на комплексной фазовой плоскости), нежели в первом. Площадь «фазового портрета» имеет размерность «фазового объёма» или ДЕЙСТВИЯ, с размерностью «энергия x время». В этом смысле для фиксированного (во времени) цикла его площадь является характеристикой **энергоёмкости**, изменение которой от цикла к циклу можно проследить, например, по изменению относительной вариации **светимости** Солнца, т. е. по относительной вариации 11-летней изменчивости «солнечной постоянной» (рис. 7).

Ниже приводится оценка площадей фазовых портретов солнечных циклов 21–24, т. е. характеристик их энергоёмкости (по параметру флуктуаций космических лучей). Площади циклов 21 и 22 практически одинаковы (рис. 8). Неизменность (инвариантность) площади, как характеристики энергоёмкости, указывает на консервативность или неизменность во времени (*симметрии* по времени) в течение двух последовательных циклов – 21 и 22. Консервативность или инвариантность в указанном смысле нарушается для двух последующих циклов – 23 и 24. *Нарушение* консервативности системы означает наличие циклов с *различной* энергоёмкостью (разными площадями). Это и наблюдается в циклах 23 и 24 (см. рис. 8): максимальная площадь приходится на 23 цикл, с последующим явным *слабом* площади «сбойного» 24 цикла (начиная с 2006 г.). Примечательно, что и относительная вариация светимости Солнца, как возможная характеристика энергоёмкости цикла, начала *уменьшаться* также



**Рис. 7.** Изменения относительной вариации светимости Солнца, т. е. изменения относительной вариации 11-летней изменчивости «солнечной постоянной» для 4-х последних циклов (21–24), по данным различных спутниковых измерений (<http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant>)



**Рис. 8. Оценка площадей, замечаемых под кривыми 11-летних циклов 21–24 (с 1975 по 2014 гг.) по их «фазовым портретам», рассчитанным по среднегодовым значениям параметра флуктуаций космических лучей. Показаны номера циклов. Наибольшую площадь имеет 23 цикл. Наибольшая площадь 23 цикла является предвестником неординарного сбоя 11-летней цикличности, т. е. предвестником неординарного сбоя 11-летней цикличности в 23-24 циклах**

в 24 цикле (см. рис. 7), фактически, начиная с того же 2006 г. (см. рис. 6).

Усреднение площадей пар соседних циклов сохраняет неизменность площадей пар 11-летних циклов: 21-22 и 23-24, т. е. инвариантность площадей соседних 22-летних циклов или их энергоёмкости. Это означает консервативность (симметрию по времени) динамической системы (Солнца) в широком смысле, т. е. наличие ИНВАРИАНТА с характерным масштабом длительности 22-летнего цикла. Следовательно, после сбоя 11-летней цикличности в 23-24 циклах функционирование динамической системы (Солнца) в следующем 25 цикле (2021–2030 гг.) должно восстановиться?! И должно быть это известно уже в начале 2025 г. («точка бифуркации»). В таком случае текущий неординарный сбой 23-24 циклов будет иметь статус «локального», как и в случае локального (по нашим представлениям) сбоя, имевшего место в циклах 19–20 (см. рис. 3).

### 6. Глобальный сбой как нарушение инварианта 22-летнего цикла

*И тем не менее законы сохранения НЕ являются абсолютно незыблемыми истинами во всех без исключения случаях. Развитие науки подчас сталкивает исследователя с нарушениями этих законов, которые сами по себе играют мощную стимулирующую роль в выдвигании новых идей и постановке новых экспериментов.*

В. С. Урусов, 2013 г.

И только в случае нарушения инварианта с характерным масштабом 22-летнего цикла, т. е. нарушения

консервативности в широком смысле, мы сталкиваемся с ситуацией *глобального* сбоя 11-летней цикличности, или «**фазовой катастрофы**». Нарушение инварианта физического 22-летнего цикла означает нарушение консервативности или нарушения симметрии (во времени) динамической системы: уменьшение относительной вариации светимости Солнца подобно тому, что наблюдается сейчас в текущем 24 цикле (рис. 7). С последующим *срывом* режима регуляции энергии – автоколебаний в конвективной зоне Солнца, поскольку уже нет необходимости в «дискретном» (за цикл) **стравливании** или регуляции «избыточной» энергии, по причине отсутствия таковой. В данном представлении и *возникновение*, и *нарушение* цикличности органично связаны между собой общностью подхода к цикличности Солнца как механизма **регуляции** энергии.

В этом, по нашим представлениям, заключается природа солнечной цикличности, 11-летней и 22-летней. Солнечная цикличность есть не что иное, как автоколебательный механизм регуляции энергии (в конвективной зоне) Солнца, стабилизирующий его температуру [7]. Таким образом, по космическим лучам с высоким разрешением открываются уникальные возможности мониторинга и изучения срыва режима регуляции энергии (автоколебаний) в конвективной зоне Солнца в современную эпоху.

Наш вывод о природе солнечной цикличности находит, в целом, своё подтверждение в работе [8], основанной на энергетических оценках диссипации магнитной энергии. В частности, утверждается, что «*нельзя исключить возможность того, что вариации светимости обусловлены не только лишь диссипацией магнитной энергии, но более непосредственно связаны с конвективными потоками*». И далее: «*...на наш взгляд, вполне заслуживают внимания гипотезы о том, что дополнительное энерговыделение Солнца в максимуме цикла обеспечивается за счет более интенсивного переноса тепла к поверхности из конвективной зоны либо за счёт вязкой диссипации мелкомасштабной конвекции непосредственно вблизи поверхности*». В итоге авторы работы [8] делают следующие выводы:

1. *Физическая природа процессов, приводящих к циклическим изменениям солнечной светимости, остаётся неясной.*

2. *Диссипация магнитной энергии, по-видимому, не является основным энергетическим каналом для поддержания вариаций светимости.*

### 7. Последствия затяжного спада активности Солнца

*Не дай вам Бог жить в эпоху перемен.*  
Конфуций.

В случае реализации сценария *глобального* сбоя 11-летней цикличности, или режима «фазовой катастрофы», прогнозируется **аномальное** многолетнее повышение галактического радиационного фона, подобного

тому, который был зарегистрирован в 2007–2010 гг. (см. рис. 4). Увеличение интенсивности космических лучей способствует, как известно, усилению процесса облакообразования [9], интенсификации конвективных процессов в атмосфере и, как следствие, увеличению количества осадков и понижению температуры в планетарном масштабе. В этом состоит *альтернатива* процессу глобального потепления. Очевидно, всё это будет иметь существенное значение лишь в случае глобального сбоя 11-летней цикличности, т. е. нарушения инварианта 22-летнего цикла.

Нарушение инварианта физического 22-летнего цикла, т. е. реализация сценария глобального сбоя 11-летней цикличности (в случае не восстановления 11-летней цикличности к середине 25 цикла), могла бы означать реальность *нелинейных* режимов эволюции магнитного поля Солнца. Очевидно, что сбой 11-летней цикличности по сценарию «фазовой катастрофы» отличается от общепринятого в настоящее время сценария «линейной суперпозиции» периодических волн (например, 11 лет и 200 лет и т. д.). В соответствии со сценарием «линейной суперпозиции» наступление затяжного сбоя 11-летней цикличности ожидается лишь с середины XXI в.

Следует заметить, что в случае весьма вероятной реализации на Солнце нетривиального нелинейного режима «самоорганизованной критичности» [10], когда весьма *нерегулярно*, т. е. *катастрофически* (что существенно осложняет прогноз) стравливается избыток запасённой в системе энергии, лишает физических оснований идеологию «линейной суперпозиции волн» (11 и 200 лет) применительно к физике Солнца. В этом случае становится очевидной причина *запаздывания* (на полвека!) глобального сбоя активности Солнца, прогноз которого сторонниками идеологии «линейной суперпозиции» был дан на *середину* XXI в. В реальности же неординарный сбой 11-летней цикличности начался с 23 цикла, т. е. уже случился, притом, в *начале* 21 *столетия*, в соответствии с нашим прогнозом, данным по космическим лучам в 2006 г. [7, 11].

#### Вместо эпилога

Результаты автора нашли своё отражение в недавней итоговой монографии [12] ряда зарубежных и российских авторов по Космической погоде, вышедшей в известном зарубежном издательстве Elsevier, США:

«Несколько лет назад было достоверно установлено, что **параметр** флуктуаций ГКЛ может быть использован как **индикатор** фазы роста солнечной активности в 11-летнем цикле [5]. По данным долговременных наблюдений за флуктуациями ГКЛ, эти авторы, по сути, **предсказали** сбой фазы солнечной активности в 24 цикле. Развивая этот подход, авторы [10] не исключают так называемую **«фазовую катастрофу»** в цикле 25 (2020–30), аналогичной эпохе

глобального минимума Дальтона. Это предупреждение, на наш взгляд, заслуживает внимания».

#### Список литературы

1. Козлов, В. И. Грядет ли сбой 11-летнего солнечного цикла / В. И. Козлов // Наука и техника в Якутии. – 2006. – №1 (10). – С. 11–14.
2. Козлов, В. И. Вейвлет-образ тонкой структуры 11-летнего цикла по исследованию флуктуаций космических лучей в 20–23 циклах / В. И. Козлов, В. В. Марков // Геомагнетизм и аэрономия. – 2007. – Т. 47, № 1. – С. 47–55.
3. Обридко, В. Н. Об отрицательной корреляции между солнечной активностью и скоростью вращения Солнца / В. Н. Обридко, Б. Д. Шельтинг // Письма в Астрономический журнал. – 2016. – Т. 42, № 9. – С. 694–700.
4. Фрик, П. Г. Турбулентность : подходы и модели / П. Г. Фрик. – М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2003.
5. Kozlov V.I., Kozlov V.V. Cosmic ray fluctuation parameter as indicator of 11-year cycle activity growth phase // IOP Publishing. Journal of Physics: Conference Series 012160 doi:10.1088/1742-6596/409/1/012160. – 2013. – С. 409.
6. Витинский, Ю. И. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца / Ю. И. Витинский, М. Копецкий, Г. В. Куклин. – М. : Наука, 1986. – С. 296.
7. Козлов, В. И. Аритмия Солнца. В космических лучах : 2-е издание / В. И. Козлов, В. В. Козлов. – Якутск : Изд-во ФГБУН ИМЗ СО РАН, ИКФИА СО РАН, 2016. – 220 с.
8. Веселовский, И. С. Об энергетике солнечных циклов / И. С. Веселовский, О. Панасенко // Труды международной конференции. ГАО РАН, Пулково, 17–22 июня 2002. – Пулково, 2002. – С. 119–125.
9. Крымский, Г. Ф. Космические лучи и погода / Г. Ф. Крымский // Наука и техника в Якутии. – 2005. – № 1 (8). – С. 3–6.
10. Козлов, В. И. Аритмия Солнца. В космических лучах : 3-е издание / В. И. Козлов, В. В. Козлов. – Якутск : Изд-во ФГБУН ИМЗ СО РАН, ИКФИА СО РАН, 2018. – 206 с.
11. Kozlov V.I. Detection by cosmic rays of the predictor of a non-ordinary failure of the 11-year cyclicity of Sun // Abstract of report on 26<sup>th</sup> Extended European Cosmic Ray Symposium (E+CRS 2018) in conjunction with 35<sup>th</sup> Russian Cosmic Ray Conference (RCRC 2018) in Altai State University on July 6–10. – 2018, SH-5. P. 28.
12. Pnasyuk M., Kalegaev V., Miroshnichenko L. et al. // EXTREME SOLAR & GEOMAGNETIC CONDITIONS in book: Extreme Events in Geospace: origins, predictability, and consequences. Imprint: Elsevier – 2017. Doi: 10.1016/B978-0-12-812700-1.00013-3. Chapter 13, part 3. P. 358.