

The background of the cover is a vibrant cosmic scene. A bright, glowing yellow star is positioned in the upper right quadrant, surrounded by intricate, filamentary structures of orange and red, resembling a nebula or a complex magnetic field. The background is a deep, dark red, peppered with numerous small, distant stars. On the left side, a large, dark, curved portion of a celestial body, likely a planet or moon, is visible, adding a sense of scale and depth to the composition.

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И ГЕЛИОКЛИМАТОЛОГИЯ

**Серия «Космические лучи»
Том 28**

**МОСКВА
МАОК 2012**

НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ В КАЧЕСТВЕ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПОИСКА СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ ЯВЛЕНИЯМИ

**Хорхе Перес Пераса¹, Игорь Либин²,
Веласко Эрера¹, Виктор Янке³**

¹Институт Геофизики Национального Автономного Университета Мексики, Мексика

²Международная Академия оценки и консалтинга, Россия

³Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В.Пушкова РАН, Россия

В работах [Elsner and Kavlaikov, 2001, Kavlaikov, 2005, Kavlaikov et al., 2008a,b,c] приведены результаты корреляционного анализа интенсивности ураганов, которые указывают на существование связей циклонических процессов с некоторыми внеземными и земными явлениями. Чтобы получить более полные результаты было решено использовать теорию сигналов, чтобы выделить достоверные периодичности в данных североатлантических ураганов всех категорий, температуры поверхности моря (Sea-Surface Temperature, SST), колебаний Атлантической Ассоциации (Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO), содержания Африканской пыли в верхних слоях атмосферы (AD), с одной стороны, и солнечная активность (SS) и галактические космические лучи (ГКЛ), с другой.

Такой анализ позволяет установить эволюцию по частоте и во времени, а также фазы между двумя временными рядами явлений, что позволяет получать данные о характере связи между ними. То есть, важно найти периодичности в космофизических процессах, которые могут модулировать циклонические явления на Земле. Поскольку вопрос о роли Солнца в модуляции этих явлений до конца не выяснен, требуются дальнейшие оценки поведения основных общих периодичностей AMO, SST, AD, явлений солнечной активности (SS), галактических космических лучей (ГКЛ) и интенсивности ураганов.

I. Методы анализа

1. Спектральные методы на основе БПФ и АРСС

Самые простые и широко известные методы для исследования общих периодичностей между двумя рядами данных являются преобразование Фурье, быстрое преобразование Фурье и регрессионный анализ. Эти методы дают прекрасные результаты для стационарных временных рядов, но практически не самые лучшие для временных рядов, которые не имеют стационарного характера [Прилуцкий, 1995, Torrens and Compo, 1998, Torrens и Webster, 1999, Гулинский, 1999, Кей и Марпл, 1995; Polygiannakis et al., 2003]. Не слишком улучшает картину использование авторегрессионных методов (методы Берга, Левинсона-Дербина, Писаренко, Прони и их модификации). В этом случае оцениваются, тем или иным способом, коэффициенты авторегрессии и подбирается наилучший порядок, а уже по этим коэффициентам однозначно вычисляется спектр. Такой подход с применением различных алгоритмов был реализован Гулинским и Юдахиним и в некоторых случаях дал хорошие результаты.

В отличие от вышеперечисленных стандартных методов анализа, одним из наиболее мощных современных инструментов для работы с нестационарными процессами является так называемый Wavelet спектральный анализ, позволяющий исследовать временную эволюцию основных частот в нестационарных рядах (Morlet-Wavelet) для анализа локализованной вариации мощности [Torrence and Compo, 1998; Grinsted et al, 2004, Grossman, 1984; Астафьева, 1996]. В настоящее время цифровой анализ сигналов, основанный на вейвлет-преобразовании, начинает применяться в задачах распознавания образов и сжатия видеоизображений, самой различной природы (снимки минералов, спутниковые изображения облаков или поверхностей планет, галактик, снимки различных турбулентных процессов и т.д.); при обработке и синтезе различных сигналов, например, речевых, виброакустических, сейсмосигналов; для изучения свойств турбулентных полей и т.д. [Астафьева, 1996; Поршневу, 1999, 2003; Кравченко, 1996; Misiti, 2001].

Предлагаемый способ анализа двух нестационарных временных рядов дает возможность выяснить есть ли прямые или нелинейные связи между процессами (осуществляется с помощью Wavelet метода когерентности). На выходе мы получаем информацию о том, когда и какие периодичности совпадают во времени, какова их природа, наличие прямых или нелинейных связей между процессами (например, солнечных и земных явлений), наличие фазовых характеристик между ними [Макс, 1983; Чуи, 2001].

2. Morlet Wavelet анализ

Для того чтобы проанализировать локальные изменения мощности в пределах одного из нестационарных временных рядов, таких как пыль или ураганы серии, мы применяем Wavelet (WT) с использованием Morlet Wavelet анализа, состоящего из комплексной экспоненты модулируется гауссовской функцией $e^{i\omega_0 t/s} e^{-t^2/(2s^2)}$, где t -время, $S = 1/\text{частота}$ и есть масштаб Wavelet и ω_0 является безразмерной частотой. Используется $\omega_0 = 6$, чтобы удовлетворить условию допустимости [Farge, 1992; Torrence and Compo, 1998, Torrence and Webster, 1999]. определен мощность Wavelet $|W_n^X|^2$, где W_n^X вейвлет-преобразование временных рядов X и n индекс времени. Спектры мощности для каждого из анализируемых параметров вычислялись с помощью Morlet Wavelet как материнской волны.

Для спектра Morlet Wavelet уровень достоверности оценивается по отдельной шкале, используя только значения внутри конуса влияния (COI). COI - область Wavelet-спектра, где краевые эффекты становятся важными [Torrence and Compo, 1998, Hudgins et al, 1993]. Вейвлет спектральная плотность мощности (WPSD) рассчитывается для каждого параметра; контур этого конуса превышает 95%-ный доверительный интервал, то есть в пределах COI. Для определения уровней значимости глобального спектра мощности Wavelet (Вейвлет) необходимо выбрать соответствующий спектр фона.

Когерентность системы может быть вычислена через отношение сигнал/шум ($WTC_{s/n}$) [Velasco et al 2010] как $R_{s/n}^2(\psi) = \frac{R_k^2(\psi)}{1 - R_k^2(\psi)}$. Кроме того, для определения $WTC_{s/n}$ $0 \leq R_{s/n}^2(\psi) \leq 1$ именно то, что мы

используем в этой работе, потому что это позволяет нам находить линейные и нелинейные связи между анализируемыми процессами для проверки истинности полученных результатов и минимизации воздействия шума. Если XWT и WTCs/n из двух серий достаточно высоки, спектры показывают фазы между явлениями.

На правых панелях графиков, приведенных в настоящей работе, представлены глобальные вейвлет спектры $GXWT(\psi) = \sum_k \langle W_k^{XY}(\psi) \rangle$ и $GWTC_{s/n}(\psi) = \sum_k \left| \langle R_{s/n}^2 k(\psi) \rangle \right|$, которые представляют в среднем мощности каждой периодичности в обоих процессах и спектры когерентности (XWT и WTC_{s/n}). Обычно используется для выявления

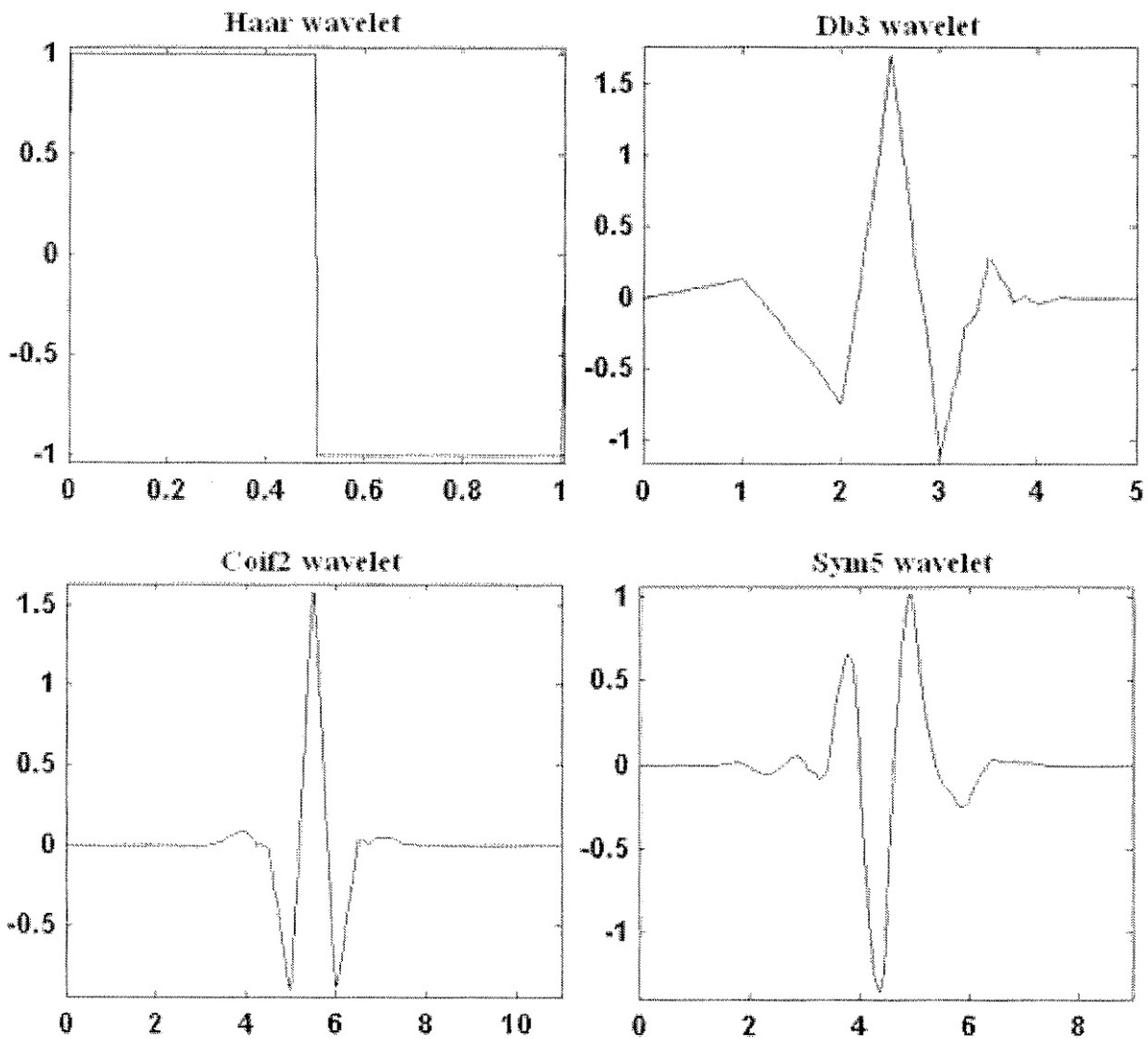


Рис. 1 Примеры базисных вейвлет-функций

глобальных периодичностей. Уровень достоверности глобальных вейвлет-спектров обозначается пунктирной кривой, которая соответствует 95%-ному уровню красного шума [Grinsted, 2004]. Этот метод позволяет показать мощность вклада каждой периодичности внутри COI.

II. Когерентный анализ наземных и космофизических воздействий

Изучение временных вариаций солнечной активности представляет значительный интерес не только с точки зрения физики Солнца. Современная гелиогеофизика и гелиоклиматология [Либин, 2009] рассматривают активность Солнца как один из ведущих факторов, воздействующих на состояние околоземного пространства, а также, на глобальные и локальные климатические колебания. Уже накоплено немало достаточно убедительных свидетельств реальности влияния как кратковременных (не более нескольких суток), так и долговременных (десятки и сотни лет) вариаций солнечной активности на соответствующие изменения глобального и регионального климата Земли. Однако, неоспоримых прямых количественных доказательств существования солнечно-климатических связей до сих пор не получено, так что дискуссии по данной проблеме всё ещё продолжаются, следствием чего являются спекуляции на антропогенном характере глобального потепления.

Для получения исчерпывающего ответа на указанные вопросы требуется совместное изучение колебаний различных параметров солнечной активности и климата на различных временных шкалах (от нескольких дней до сотен лет и более). Прямые экспериментальные измерения физических параметров активности Солнца, земного климата и различных космофизических факторов охватывают, в основном, не более нескольких десятков последних лет [Дорман, 1987; Либин, 1989; Дорман, 1991; Пудовкин, 1992; Peres Perasa, 1994; Либин, 2004; Либин, 2009]. В то же время, данные солнечной палеоастрофизики и палеоклиматологии [Кочаров, 1996] дают возможность реконструировать временной ход различных параметров

климата и активности Солнца на временных шкалах до нескольких тысяч лет и более.

Следует отметить, что анализ подобных палеоданных зачастую требует применения специальных математических и статистических подходов, разработка и тестирование которых сегодня стали одной из задач современной гелиоклиматологии [Friis-Christensen, 1991; Гулинский, 1992; Либин, 2006; Либин, 2009]. Тем не менее, воздействие солнечной активности на климат Земли представляется весьма вероятным, а на целый ряд процессов в околоземном пространстве доказанным.

Не вызывает сомнений влияние активности Солнца на так называемую космическую погоду. Кстати, этот термин, появившийся не

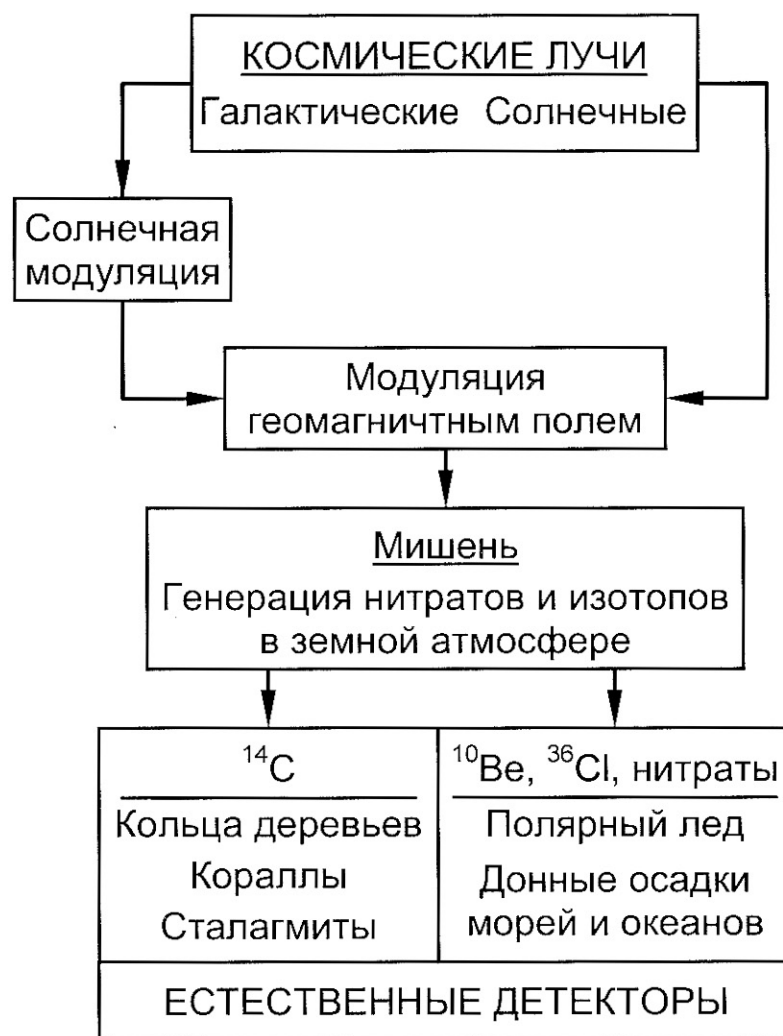


Рис. 2 Принцип работы естественных детекторов космических лучей

так давно [Ораевский, 1998], описывает физическое состояние околоземного пространства (высокие слои атмосферы, магнитосфера) в определённый момент или промежуток времени характеризуемое совокупностью гелиогеофизических параметров (интенсивность электромагнитных излучений и потоков солнечных космических лучей (СКЛ), степень ионизации, температура, скорость и плотность частиц солнечного ветра, интенсивность флуктуаций геомагнитного поля).

Данные.- Для оценки долгосрочных соотношений между космическими явлениями и показателями глобального климата необходимо использовать результаты наблюдений галактических космических лучей (КЛ), солнечной активности (SS) и климатических явлений.

Прямые измерения солнечной активности (на основе числа солнечных пятен) ведутся со середины XVIII века (1749 год). В работе использовались данные солнечной активности (SS), полученные в ИЗМИРАН и <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsunspotnumber.html#american>. Надёжные данные измерений КЛ доступны только с 1950-х, когда начали действовать нейтронные мониторы мировой сети станций космических лучей.

Что касается данных ^{10}Be , до настоящего времени в научных кругах существует полемика о том, может ли ^{10}Be рассматриваться в качестве точного и достоверного «информатора» о галактических космических лучах в прошлом [Стожков и др., 2004, Stozjkov, 2004, 2007]. Тем не менее, большое количество исследователей до сих пор поддерживают использование данных о ^{10}Be для определения интенсивности космических лучей в прошлом [Wagner et al, 2000; McCracken, 2001; McCracken and MacDonald, 2001; Usoskin, 2005, Usoskin and Kovaltzov, 2007]. В соответствии с этим, в работе использовались данные концентрации ^{10}Be в ледяном керне Dye 3 (65,2 N, 43,8 Вт, 2477 м над уровнем моря) за 1851-1985 гг. из работы [Beer et al, 1990], предоставленные автором.

Данные о климатических явлениях можно уверенно использовать, начиная с конца 19 века. Для АМО (или САО) ежегодные измерения были начаты между 1851 – 1985 годами и доступны в Мировом центре палеоклиматологических данных <http://www.ncdc.gov/>

paleo/. Что касается данных об ураганах, использовались данные <http://weather.unisys.com/hurricane/>. Рассматривались ураганы различных категорий, которые формировались в Атлантическом океане с 1965 по 2004 годы (рис. 5).

Данные о температуре поверхности моря в Атлантическом океане приведены в литературе за период 1851-2005 (рис. 3 и 4). Хотелось бы отметить, что самые ранние измерения температуры были собраны и обобщены немецким метеорологом Генрихом Вильгельмом Дове и капитаном ВМС США Мэтью Маури, который впервые в 1830–1840 г.г. начал измерение температур на море и предложил методику их стандартизации. С 1850 г. национальные службы стали согласованно собирать и сохранять данные наблюдений наземных температур. В 1853 г. в Брюсселе было подписано международное соглашение по проведению измерений, а также сбору и обмену наземными и морскими метеорологическими данными. Метеорологическая сеть стала быстро расти и через сто лет к концу 1950 г. стала всемирной, распространившись и на Антарктиду. Однако эти измерения выполнялись не всегда по одинаковым методиками, и их трудно, а иногда и невозможно было сопоставлять.

В 1980–1990 г.г. группа американских и английских ученых под руководством Ф.Д. Джоунса и Т.М. Уигли провела фундаментальное исследование [Джоунс, 1990]. Они собрали и проанализировали все существующие архивные данные наблюдений температуры с 1850 г. по 1990 г. В результате получилась база данных, содержащая 1584 метеостанции в Северном полушарии (из 2666 первоначальных) и 293 в Южном (из 610). По данным этих станций были рассчитаны средние значения температур в регионах, полушариях и глобальные температуры (по годам) для всей Земли. В настоящей работе использовались данные из <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/treering/reconstructions/amo-gray2004.txt>.

Спектральный анализ среднегодовых значений температуры, полученных на глобальной сети метеорологических станций за период 1880–2010 гг., показал наличие линий, превосходящих по амплитуде 95–99%-й интервал. Наиболее выражены в спектре линии с периодами 192.0 (0.2°C); 64.8–130.0 (более 0.5°C); 32.5 (0.2°C) и 21.(0.5°C) год. В результате полного анализа данных была выде-

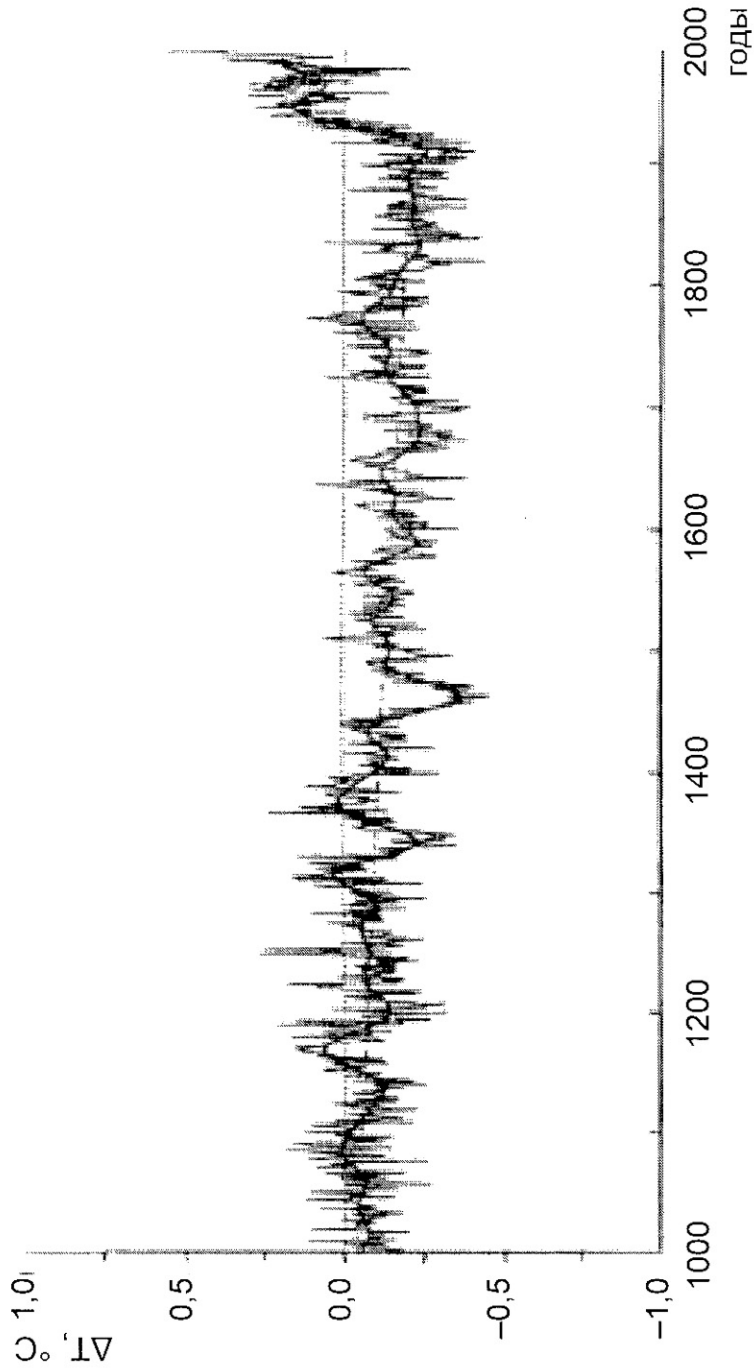


Рис. 3 Реконструкция изменения глобальной температуры северного полушария с 1000 г до настоящего времени

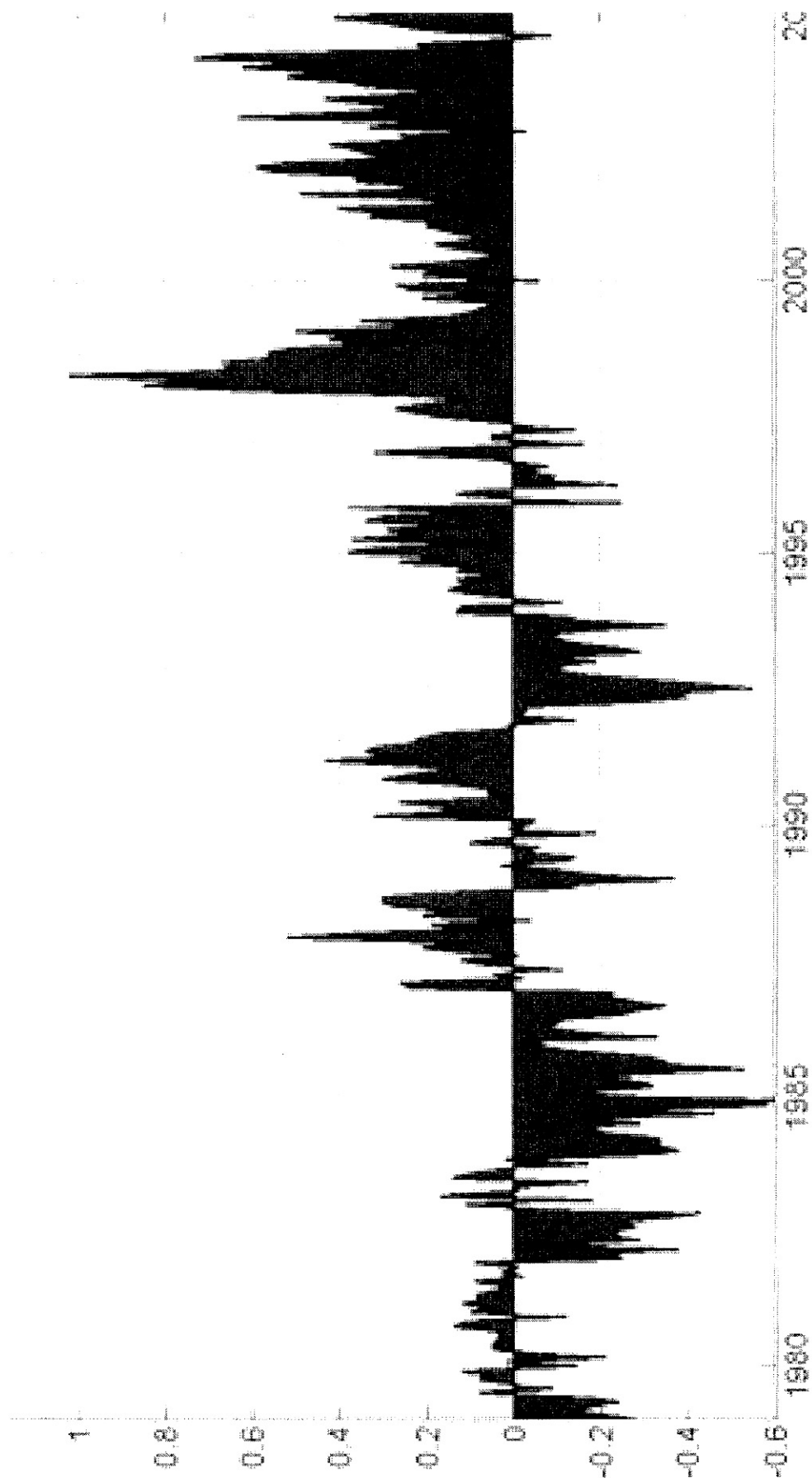


Рис. 4 Поведение поверхностной температуры в Северной Атлантике

Таблица 1

Ежегодные данные количества циклонов (по категориям – 5-1; TS - тропические шторма, ST - тропические депрессии)

Годы	Типы циклонов							Всего циклонов
	5	4	3	2	1	TS	ST	
1965	0	1	0	1	2	2	0	6
1966	0	1	2	0	4	4	0	11
1967	1	0	0	1	4	2	0	8
1968	0	0	0	0	4	3	0	7
1969	1	0	5	2	4	6	0	18
1970	0	0	2	1	2	5	0	10
1971	1	0	0	1	4	7	0	13
1972	0	0	0	1	2	1	3	7
1973	0	0	1	0	3	3	1	8
1974	0	1	1	1	1	3	4	11
1975	0	1	2	2	1	2	1	9
1976	0	0	2	2	2	2	2	10
1977	1	0	0	0	4	1	0	6
1978	0	2	0	1	2	6	0	11
1979	1	1	0	1	2	3	1	9
1980	1	0	1	3	4	2	0	11
1981	0	1	2	1	3	4	1	12
1982	0	1	0	0	1	3	1	6
1983	0	0	1	0	2	1	0	4
1984	0	1	0	1	3	7	1	13
1985	0	1	2	0	4	4	0	11
1986	0	0	0	1	3	2	0	6
1987	0	0	1	0	2	4	0	7
1988	1	2	0	0	2	7	0	12
1989	2	0	0	2	3	4	0	11
1990	0	0	1	2	5	6	0	14
1991	0	1	1	1	1	4	0	8

1992	1	0	0	2	1	2	1	7
1993	0	0	1	1	2	4	0	8
1994	0	0	0	1	2	4	0	7
1995	0	3	2	2	4	8	0	19
1996	0	2	4	0	3	4	0	13
1997	0	0	1	0	2	4	1	8
1998	1	1	1	4	3	4	0	14
1999	0	5	0	3	0	4	0	12
2000	0	2	1	1	4	6	1	15
2001	0	2	2	1	4	6	0	15
2002	0	1	1	1	1	8	0	12
2003	1	1	1	1	3	9	0	16
2004	1	3	2	1	2	5	1	15

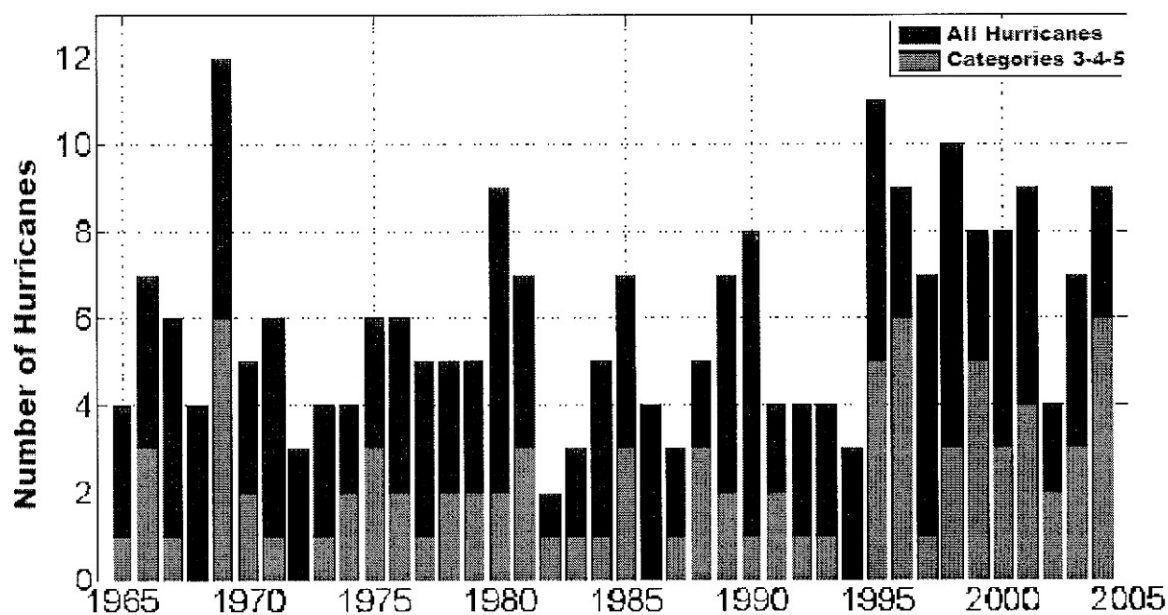


Рис. 5. Общее количество североатлантических ураганов (темный) и ураганов категории больше 3 (светлый)

лена «квазистолетняя» вариация в температуре Северного полушария Земли, отчётливо выраженная на протяжении не менее 450 последних лет и способная давать заметный и вполне конкретный (0.5°C и более) вклад в процесс повышения температуры в XX веке [Либин, 2009]. Расчеты показывают, что данная «квазистолетняя» периодичность в реальности расщепляется на две периодичности:

65–85-летнюю и 100–130-летнюю. Наличие аналогичной бимодальной структуры у «квазистолетнего» солнечного цикла Глайссберга подтверждено на основе обширного палеоастрофизического материала [Распопов, 1998; Хорозов, 2009]. Причиной такого совпадения квазипериодической структуры вариаций температуры и солнечной активности (как по периодам, так и по фазам процессов) может служить фактическая связь Солнце – климат на вековой шкале времени.

Как показал взаимный спектральный анализ обоих процессов [Борисенков, 1988] в климате Северного полушария наблюдается общая с солнечной активностью «квазистолетняя» волна, которая также состоит из двух временных вариаций с периодами 11-лет, 22-года, 50–85 лет и 100–135 лет, т.е. спектр поведения температуры близок к спектру вековой солнечной цикличности. При этом, средняя амплитуда колебаний глобального «квазивекового» цикла достигает 0.2°C от пика к пику [Хорозов, 2009]. Определённая синхронность между «квазистолетней» климатической вариацией и вековым циклом в концентрации ^{10}Be обнаружена для последних пяти веков [Кочаров, 1996]. В работе [Распопов, 2007] показано, что «квазистолетние» колебания температуры в Северном Полушарии за последние 130 лет хорошо коррелируют с циклом Глайссберга в солнечной активности, но опережают его по фазе на 15–20 лет, причем этот эффект, ранее установленный для глобальной среднегодовой температуры [Friis-Christensen and Lassen, 1991] отчетливо выражен и в региональной температуре северной Скандинавии в течение трех последних веков.

В результате проведенных авторами вычислений [Либин, 2009; Perez Peraza, 2010; Perez Peraza, 2011] показана вероятная взаимосвязь процессов на Солнце и в атмосфере Земли, при этом анализ поведения запаздывания между атмосферными процессами и солнечной активностью показывает существование стабильных сдвигов от 11 до 22 лет между процессами, что хорошо согласуется с результатами расчетов по другим методикам [Perez-Enriquez 1988]. Кроме того, выявлено, что при совместном анализе температуры в различных точках Земли и солнечной активности выбор индексов солнечной активности не играет решающей роли: так пло-

щадь пятен в приэкваториальной зоне Солнца представляется авторам наиболее приемлемым индексом для расчетов [Либин 1994]. Поэтому, при решении задач выявления механизмов крупномасштабных процессов в атмосфере или попытках создания прогностических моделей климатологических или гидрологических процессов необходимо учитывать изменения солнечной активности, процессы в межпланетной среде и наблюдаемые на Земле вариации космического излучения.

Тем не менее, на основании полученных за последние годы результатов авторами сделан вывод, о том, что одной из причин взаимосвязи «квазистолетних» циклов солнечной активности и климата может служить воздействие на климатическую систему долговременной вариации прозрачности атмосферы, вызванной колебаниями атмосферной ионизации под действием вековых циклов в интенсивности галактических и солнечных космических лучей [Dorman, 2005; Dorman, 2007].

По данным Дмитриева, возрастание ультрафиолетового излучения, при повышении солнечной активности, вызывает увеличение перистой облачности в обоих полушариях в среднем на 0,25–0,5 балла, что может привести к снижению эффективного излучения Земли на 1–2%. При сильных вспышках ультрафиолетового излучения зарегистрировано увеличение перистой облачности на 2–3 балла. Как показано в работе [Хорозов, 1988], для объяснения современного глобального потепления достаточно уменьшения эффективного излучения Земли в среднем всего лишь на 0.1–0.2%. Действительно, расчеты показывают, что пренебрегая малой теплоемкостью атмосферы и суши по сравнению с теплоемкостью верхнего слоя океана и принимая во внимание то, что приток солнечной энергии приблизительно равен эффективному излучению Земли, наблюдающееся глобальное потепление вполне возможно за счет увеличения облачности в верхних слоях атмосферы (перистые, перламутровые, серебристые облака).

Нужно отметить, что в ряде анализируемых процессов зачастую происходит существенная перестройка их статистических характеристик, т.е. процессы становятся нестационарными. В этом случае становится неопределенным само понятие спектра, а классическое

преобразование, основанное на методах быстрого преобразования Фурье и Блэкмана-Тьюки дает зачастую неверные результаты. Поэтому, каждый результат, даже полученный APCС-методами, нуждается в тщательной проверке. Проверка полученных результатов методом «кросс-предсказания» показала нелинейный характер связи между «квазистолетними» колебаниями солнечной активности и температуры. (Если связь действительно сложная, анализ коэффициента линейной корреляции недостаточен для выявления зависимости между исследуемыми величинами). В такой ситуации вполне оправдано применение когерентного анализа.

Результаты когерентного анализа наземных и космофизических явлений отображаются на нижеследующих рисунках. В верхней части каждого рисунка показан временной ряд обрабатываемых данных. Районы внутри черного контура соответствует 95% доверительному уровню. Так как мы работаем с двумя временными рядами, то при каждом анализе мы получаем когерентность процессов и их разность фаз. Глобальные спектры (в правой части каждого рисунка) позволяют обнаруживать основные периодичности временных рядов. Уровень значимости глобальных спектров определен штриховыми линиями. Точками (на правых рисунках) обозначен уровень шума: пики ниже точечной линии подразумевают периодичности с уверенностью не более 95% на соответствующей частоте, тогда как пики выше точечной линии, показывает уровень достоверности выше 95% при данной частоте. Спектральная мощность (ось абсцисс) определяется в условных единицах.

Основные результаты, которые можно сделать из когерентного анализа, можно резюмировать следующим образом:

1) В период 1900-1980 годов между AMO и SST-аномалиями с достоверностью выше 95% существует согласованность в колебаниях с периодом 15-32 года. Колебания на частоте, эквивалентной 30 годам, абсолютно синфазные, указывая на существование причинно-следственных связей между ними.

2) Выявление когерентности между SST-аномалиями и SS ограничено короткими интервалами имеющихся данных. Тем не менее, наблюдается 11-летняя периодичность в обоих процессах (для 1895-1910 и 1945-1960 гг., в противофазе) и 22-летняя периодич-

ность (для 1940-1980, в фазе). 30-летних периодичностей, характерных для AMO и SST в солнечной активности (по крайней мере с помощью SS) не наблюдается.

3) С достоверностью не выше 90% наблюдается когерентность между SST аномалиями и ^{10}Be (прокси-ИКЛ) на частоте, эквивалентной периодичности длительностью порядка 30 лет (в интервале времени 1920-1950). Необходимо отметить, что совпадение колебаний зачастую носит квазислучайный характер. Фаза колебаний имеет тенденцию быть квази-перпендикулярно, что указывает на сложные и достаточно косвенные причинно-следственные связи между климатическими явлениями и ИКЛ. Аналогичные результаты получаются при совместном анализе AMO и ^{10}Be за период 1870-1950, но с еще более низкой когерентностью $\sim 0,75$ [Perez Peraza et al., 2011]).

Из рис. 6 хорошо видно, что для периода 1875 – 1895 гг. существует нелинейная когерентность с достоверностью больше 0,80 между AMO и SS вблизи частоты, эквивалентной периодам поряд-

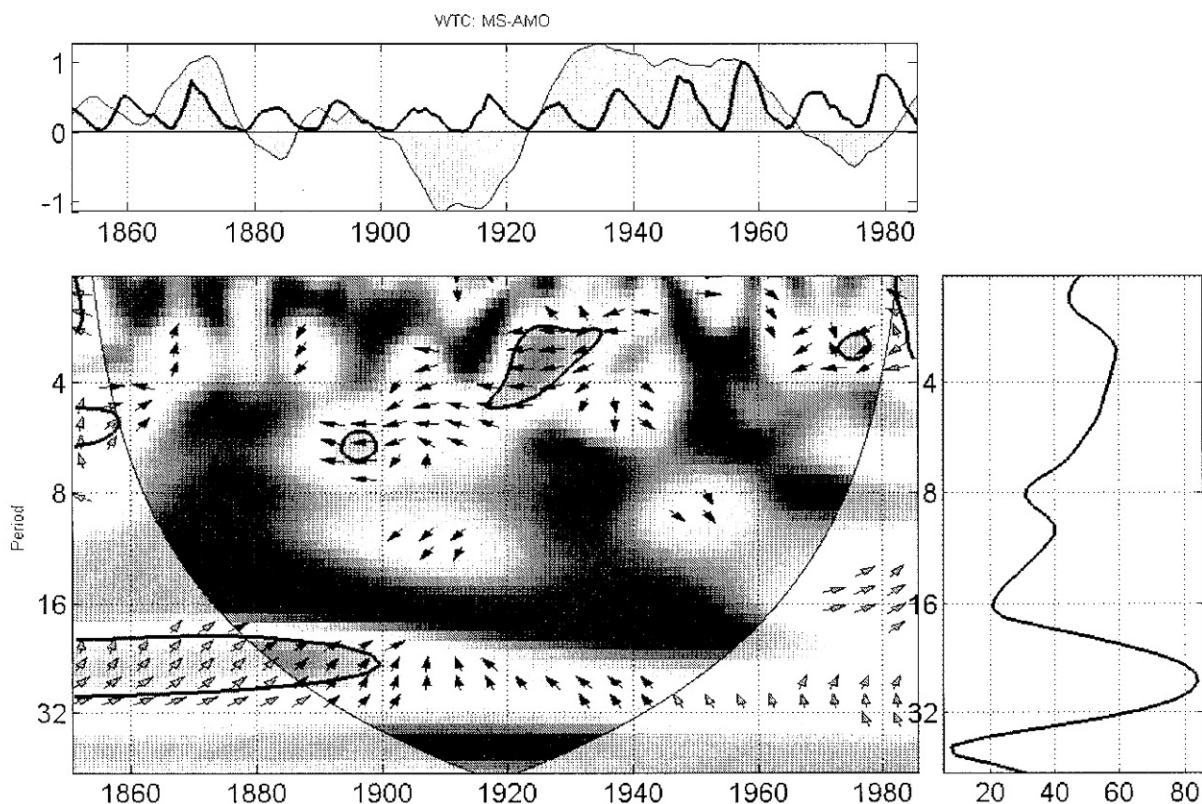


Рис. 6. Когерентный анализ между AMO (серая зона) и SS (черная линия)

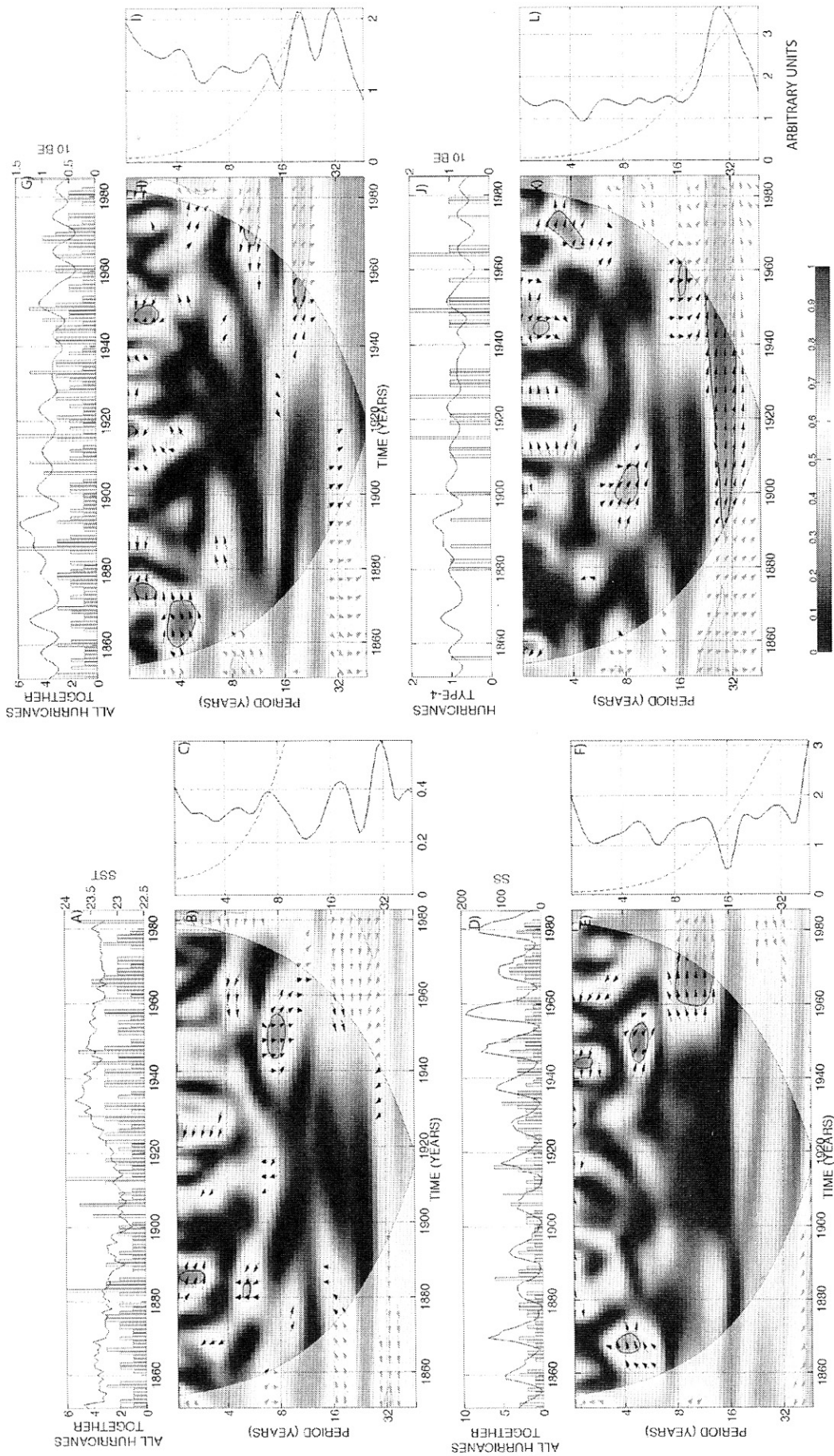


Рис. 7. Когерентность между SST и ураганами (C), между SS и всеми ураганами вместе (F), между ИКЛ (10Be) и всеми ураганами вместе (I) и ураганами категории выше 3 (L)

ка 16-30 лет. Наблюдается также небольшой пик (достоверность порядка 60%), соответствующий колебаниям в диапазоне 3-7 лет (в период 1890-1930).

III. Взаимный когерентный анализ наземных и космофизических воздействий с циклонами

Результаты анализа когерентности между SST и ураганами (C); между SS и всеми ураганами вместе (F); между ИКЛ (^{10}Be) и всеми ураганами вместе (I) и, наконец, между ИКЛ и ураганами категории выше 3 (L) приведены на рис.7. Рисунок можно прокомментировать следующим образом:

1) Существует согласие (когерентность с достоверностью 0.9, в противофазе) между общим количеством ураганов и SST-аномалиями (COI).

2) В отдельные периоды времени (например, в 1955-1965) существует согласие (когерентность с достоверностью 0.9, в противофазе) между общим количеством ураганов и SS на частотах, соответствующих периодичностям порядка 11 лет. Тем не менее, для всего анализируемого интервала достоверность расчетов спектральных характеристик существенно ниже (0.6).

3) Когерентность ИКЛ (^{10}B) на частоте, соответствующей 15-30 лет, с ураганами всех величин вместе составляет около 0,6 в период 1890-1940. Для периодичностей 5-7, 11 и 22 года достигается когерентность порядка 0,9 в интервалах 1860-1870, 1960-1970 и 1950-1960 годов соответственно.

4) Для некоторых ураганов, как, например, эти величины-4 и более, согласованность с ИКЛ (^{10}B) составляет $> 0,9$ при частоте 30 лет в течение относительно длительного периода, 1890-1950, при этом оба процесса находятся в фазе, что указывает на линейную зависимость между обоими явлениями.

IV. Когерентный анализ африканской пыли и циклонов

Для когерентного анализа ураганов и африканской пыли использовались спутниковые данные, начиная с 1980-х годов прошлого

века, и ежемесячные данные из Барбадоса с 1966 г. [Prospero, 1999, 2006]. Ежемесячные данные ураганов были взяты из Национальной службы погоды США и преобразованы в серии данных с помощью широтно-импульсной модуляции (Pulse Width Modulation, PWM) в виде: p = число ураганов, где 0 = нет урагана. Детальный анализ результатов приведен в работе авторов [Perez Peraza et al., 2010], остановимся лишь на наиболее важных результатах.

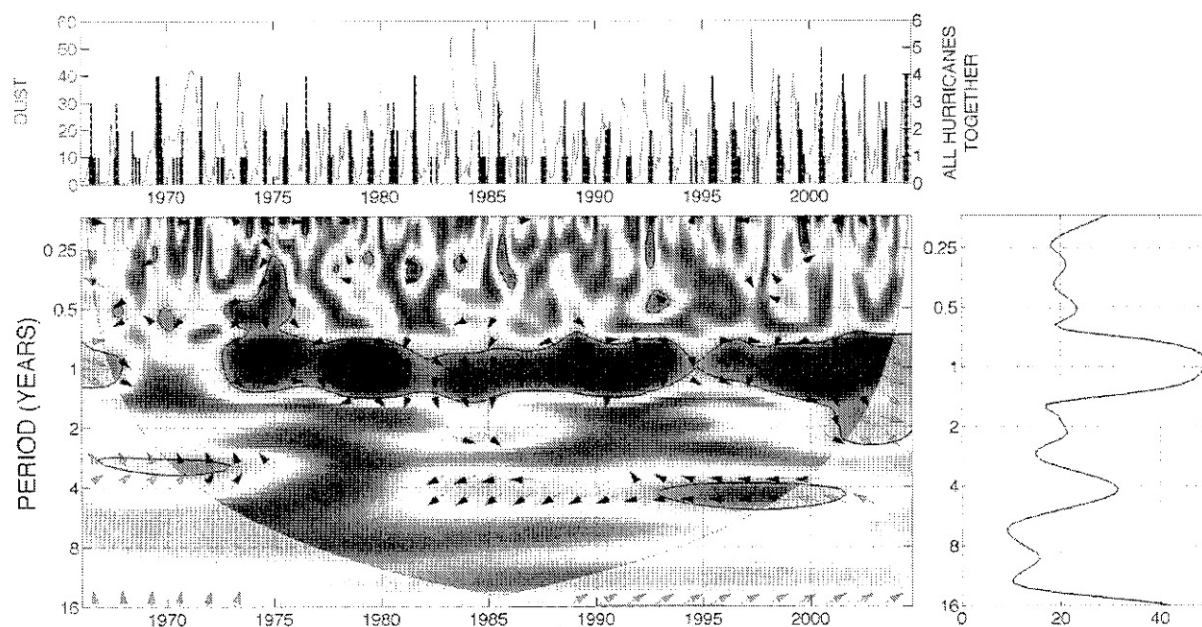


Рис. 8 – Верхняя панель - временной ряд данных африканской пыли (заштрихованная область) - все ураганы категорий вместе (черные полосы), нижняя панель - вейвлет-квадрат преобразования когерентности (WTC), правая панель - глобальные спектры GXWT

Расчеты XWT и $WTC_{s/n}$ показывают, что многолетние периодичности, в том числе 11-летняя, не являются существенными факторами в формировании тропических штормов. Результаты расчетов глобальных спектров GXWT и $WTC_{s/n}$, а также кросс-спектров и когерентностей между рядами данных по содержанию пыли в верхних слоях атмосферы и интенсивности ураганов категории 1, обнаруживают хорошее согласие с аналогичными результатами для мощных тропических штормов, хотя и с различной интенсивностью. Эти различия могут быть обусловлены увеличением осадков в Север-

ной Африке, на что указывает индекс осадков Сахель [<http://jisao.washington.edu/data/sahel/022208>]. Необходимо отметить, что для ураганов категории 1, одиннадцатилетняя периодичность отсутствует. Можно наблюдать хорошо выраженную годовую волну, которая становится максимальной в периоды 1972-1982 и 1988-2004. Кроме того, наблюдаются менее известные периодичности 3.5-5.5 лет, связанные с Эль-Ниньо (Южная Осцилляция, ЭНКО) [http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml]. Одиннадцатилетние периодичности отсутствуют также для ураганов категории 2.

Аналогичные расчеты G_{XWT} и $G_{WTC_{s/n}}$ для африканской пыли и ураганов категорий 3 и 4 показывают хорошее согласие с предыдущими расчетами X_{WT} и W_{TC} : в данных наблюдаются отчетливо выраженная годовая периодичность (которая, тем не менее, не является постоянной во времени) и более мощные (чем для ураганов категорий 1 и 2) периодичности 3,5 лет (в интервале 1988-2002 гг.). Одиннадцатилетние периодичности для ураганов категории 3 и 4 также практически отсутствуют. Расчеты спектров G_{XWT} для пыли и ураганов категории 5 демонстрируют, как и ранее, годовую волну с достоверностью уверенно выше 95%. При этом, в поведении этой периодичности наблюдается высокая изменчивость, она не является непрерывной. Эта годовая периодичность, по-видимому, связана с сезонными изменениями в атмосферной циркуляции [Husar, et al., 1997]. Кроме того, в результатах появляется уверенно выделяемая 11-летняя волна (11-13 лет), которая присутствует на протяжении всего временного интервала с тенденцией анти-корреляции с пылью [Velasco Herrera et al., 2010].

Эта периодичность предположительно связана с изменениями трансатлантических ветров и доминирующего меридионального режима SST-изменчивости в тропической части Атлантического океана [Shanahan et al., 2009], с солнечной активностью [Hodges and Elsner, 2010] и поведением космических лучей [Pérez-Peraza et al., 2008a]. Взаимодействие солнечной активности и космических лучей с ураганами, вероятно, осуществляется путем модуляции в ураганной активности Атлантики одиннадцатилетних колебаний [DeMaria et al., 1993, Pérez-Peraza et al., 2008a].

Эти одиннадцатилетние изменения для ураганов 5 категории и пыли объясняют, почему с 2008 года до настоящего времени, у нас не было ураганов категории 5, так как именно в это время наблюдалось увеличение содержания в атмосфере африканской пыли. Это означает, что если такая тенденция будет продолжаться, то следующая группа тропических циклонов начнет развиваться не раньше следующего десятилетия. При проверке истинности полученных результатов были также выявлены квазидвухлетние колебания циклонической деятельности, хотя и меньшей амплитуды.

В заключение, следует подчеркнуть, что наблюдаемые корреляции показывают не только прямое влияние африканской пыли на активности ураганов, но и отражают косвенное отношение между ветром, SST, AMO, циклом Modoki, Эль-Ниньо (El Niño), Ла-Нинья (La Niña), поверхностной температурой океана, осадками, солнечной активностью и космическими лучами, которые в большей или меньшей степени модулируют эволюции ураганов Атлантики.

У. Связь между поведением ИКЛ и циклонами

Для сравнения влияния космических лучей на циклоны с влиянием африканской пыли, в течение достаточно короткого периода (1966-2006) нет необходимости привлекать данные ^{10}Be , достаточно использовать суточные, ежемесячные и среднегодовые данные измерений ИКЛ с помощью нейтронных мониторов мировой сети станций космических лучей. Результаты расчетов взаимных спектров ИКЛ и циклонической деятельности (аналогично, как это делалось для пыли и ураганов) показывают, что когерентность на частотах, соответствующих многолетним колебаниям (квазидвухлетние, 5-7-летние и т.д.), между ИКЛ и ураганами высоких категорий гораздо выше и устойчивее, нежели для ураганов и африканской пыли. Детальный анализ для ураганов разных категорий и ИКЛ приведен в работе [Perez Peraza, 2011].

Результаты спектрального анализа, проведенного для изучения общих периодичностей в космических лучах и явлениях, которые предположительно связаны с ураганами (AMO и SST-аномалии), хорошо согласуется с ранее полученными результатами [Pérez-

Peraza et al, 2008a, 2008b]. Обнаружены общие периодичности в некоторых внеземных и земных явлениях, а именно 3,5-5,5, 7, 11 и большие периодичности. Заметим лишь, что волна 30 ± 2 года присутствует во всех процессах (кроме SS). Следует отметить, что эта частота (соответствующая периодичностям 30 лет) может являться гармоникой векового цикла (90-120 лет) солнечной активности, то есть, половиной из так называемых Yoshimura-Gleissberg циклов [Yoshimura, 1979]. Необходимо отметить, что впервые «квазистолетние» (или вековые) циклы были выявлены в работах по анализу временных изменений солнечной активности и климата Земли.

Анализ параметров солнечной активности и температуры проводился авторами как с помощью методов традиционного корреляционного, спектрального и авторегрессионного анализа, так и с помощью методов анализа случайных процессов, разработанных в последние годы. При этом, если традиционные методы (с их достоинствами и недостатками), как правило, хорошо известны, то использование новых методов анализа дает возможность независимого контроля полученных результатов. Как было указано ранее, спектральный анализ среднегодовых значений T_p , полученных на глобальной сети метеорологических станций за период 1880–2010 гг., показал наличие линий, превосходящих по амплитуде 95–99%-й интервал. Наиболее выражены в спектре линии с периодами 192.0 (0.2°C); 64.8–130.0 (более 0.5°C); 32.5 (0.2°C) и 21. (0.5°C) год, что хорошо совпадает с результатами анализа ураганов и пыли. Причиной такого совпадения квазипериодической структуры вариаций циклонической деятельности и содержания пыли в верхних слоях атмосферы и солнечной активности (как по периодам, так и по фазам процессов) может служить фактическая связь Солнце – климат на вековой шкале времени. Результаты расчетов когерентности между изучаемыми явлениями могут быть истолкованы, что модуляционным агентом земных явлений является открытое магнитное поле Солнца, модулирующее через ГКЛ (через ^{10}Be). Эта модуляция явно прослеживается для периода 1880 - 1960 гг. Это не значит, нет модуляции до и после этого времени, но в соответствии с методикой вейвлет когерентности, ее уровень достоверности ниже, чем 95%. Кажется, что ГКЛ являются источником модуляции для SST, и

АМО (рис. 6, в работе [Ram and Stolz, 2009]), а те, в свою очередь, модулируют в некотором роде, ураганы. Последнее хорошо видно в результатах вейвлет-анализа когерентности.

Выводы

При исследованиях нестационарных (или квазистационарных) процессов с помощью методов теории анализа сигналов, важно помнить, что какие бы интересные и замечательные результаты не получались бы, такого рода анализ является только первым необходимым шагом для исследования. Мало определить достоверность существующих связей между двумя временными рядами, чтобы охарактеризовать их физические связи или механизмы. Корреляционный анализ только обеспечивает глобальную информацию о степени линейной зависимости между двумя временными рядами, но практически не дает информации, когда корреляционная зависимость имеет нелинейный характер. Частично вопросы нелинейных связей решает авторегрессионный анализ с применением АРМА-моделей высоких порядков [Кей, 1996; Гулинский, 1998; Либин, 2009].

В работе сделана попытка анализа между североатлантическими ураганами всех категорий, земными явлениями SST, АМО, африканская пыль, космофизическими (внеземными) явлениями, как солнечная активность (SS), геомагнитная деятельности (Kp) и GCR (Галактические космические лучи). Выявленные совпадения в периодичностях, наблюдаемых в космических лучах, и явлениях, которые предположительно связаны с ураганами (АМО и SST-аномалии), хорошо согласуются с ранее полученными результатами [Pérez-Peraza et al 2008a, 2008b, Либин, 2009]. Результаты показывают, что среди наблюдаемых периодичностей для ураганов, SST, АМО и ГКЛ, выделяется волна 30 ± 2 года (за исключением солнечной активности). Высокий уровень согласованности между ИКЛ и ураганами указывает на сильный эффект модуляции через ГКЛ, вероятно, на основе механизмов, которые описаны [Ram and Stolz, 2009]. Для того чтобы оценить актуальность влияния космофизических процессов на деятельность урагана мы сравнили ураганы

с африканскими пылевыми бурями, правда за относительно короткий промежуток времени (с 1966). Тем не менее, обнаружено несколько четко определенных сопадений в периодичностях обоих процессов в диапазоне 0,25 - 13 лет, при этом оба процесса находятся в противофазе (для ураганов категории 5, 4 и 3 наблюдается явно выраженная антикорреляция). Установлено, что когерентность между ИКЛ и содержанием пыли на больших высотах на выделенных частотах не высока. Тем не менее, при анализе влияния космофизических процессов нельзя не учитывать и содержание пыли во время мощных пыльных бурь. Со временем, этот процесс может стать той же степени важности, что и другие земные эффекты. Особо нужно подчеркнуть, что налицо влияние африканской пыли на генезис и эволюцию ураганов Атлантического бассейна: интенсивность ураганов зависит от содержания пыли в верхних слоях атмосферы и для мощных ураганов и пылевых бурь существует достоверная десятилетняя периодичность (9-12 лет). Ураганы категории 5 и больше развиваются во время минимумов десятилетних циклов содержания африканской пыли, при ветре ниже, чем 8 м/с. и океанской температуре около 26°C. В дополнение к своеобразным климатическим условиям, важным фактором возникновения и эволюции тропических циклонов категории 5 является география океанского дна, по крайней мере в четырех атлантических глубоководных регионах, и, наконец, низкое давления (порядка 920 мбар.) «глаза» урагана [Velasco et al., 2010].

Тот факт, что два ряда данных (космофизических и климатических) имеют схожие периодичности не обязательно означает, что существуют причинно-следственные связи между ними: рано или поздно потребуется физический механизм, который даст объяснения таких совпадений. Сегодня мы только в начале пути создания и накопления достоверных доказательств, поэтому сегодня еще не время построения физических механизмов. Наконец, стоит упомянуть, что если климатологические тенденции последних десятилетий сохранятся, то, согласно нашему анализу, появление будущих ураганов 5-й категории не будет наблюдаться до минимума следующего десятилетия, которое начнется примерно через 5 ± 2 лет.

Литература и библиография

Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения// Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 1. С. 1145-1170.

Гулинский О.В., Дорман Л.И., Либин И.Я., Микалаюнас М.М.: 1988. Моделирование механизма взаимодействия гелиофизических и геофизических процессов. Геомагнетизм и Аэрономия. Т.28. №6. С.1005 –1008.

Гулинский О.В., Гущина Р.Т., Дорман Л.И., Либин И.Я., Микалаюнас М., Юдахин К.Ф.: 1992. Моделирование механизма воздействия гелиофизических параметров на атмосферные процессы. В кн. «Космические лучи» № 26. М.: Наука. С. 22–56.

Джоунс Ф.Д., Уигли Т.М.Л. Тенденции глобального потепления //В мире науки (Scientific American). 1990. № 10. С. 62–70.

Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование// Успехи физических наук. 2000. Т. 171. № 5.

Кей С.М., Марпл С.Л. Современные методы спектрального анализа. ТИИЭР. 1981. т.69. № 11. с.5–52.

Кравченко В.Ф., Рвачев В.А. «Wavelet»-системы и их применение в обработке сигналов// Зарубежная радиоэлектроника. 1996. № 4. С. 3-20.

Кочаров Г.Е. Экспериментальная палеоастрофизика: достижения и перспективы. Соросовский образовательный журнал, № 11, 1996 г.

Кочаров Г.Е., Огурцов М.Г. Генерация солнечных протонов за последние 415 лет на основании данных о концентрации нитратов в полярных льдах./ Изв. РАН. Сер. физ. 1999. т. 63. № 8. с. 16–19.

Либин И.Я., Перес-Пераса Х., Яани А.: 2006. Международные гелиоклиматологические исследования: воздействие изменений солнечной активности на процессы на Земле. В кн. «Концептуальные основы развития Евразийского социально-экономического пространства в условиях глобализации», Материалы научно-прикладной Конференции МАОК. М.: МАОК. С.24–37..

Либин И.Я., Перес-Пераса Х.: 2007. Глобальное потепление: мифы и реальность. В кн. «Концептуальные основы развития социально-экономического пространства в условиях глобализа-

ции», Материалы научно-прикладной Конференции МАОК. М.: МАОК. С.8–16..

Либин И.Я., Перес-Пераса Х.: 2009. Гелиоклиматология. М.: Международная академия оценки и консалтинга. 251 с.

Либин И.Я., Гулинский О.В., Гущина Р.Т., Дорман Л.И., Микалаюнас М.М., Юдахин К.Ф. Моделирование механизма воздействия гелиофизических параметров на атмосферные процессы. Космические лучи № 26. 1992. с.22-56.

Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. В 2-х тт. Т. 2. М.: Мир, 1983.

Ораевский В.Н., Бреус Т.К., Баевский Р.М., Рапопорт С.И., Петров В.М., Барсукова Ж.В., Гурфинкель Ю.И., Рогоза А.Т. Влияние геомагнитной активности на функциональное состояние организма. Биофизика, т. 43, в. 5. 1998. с. 819–826

Поршнев С.В. Радиолокационные методы измерений кинематических характеристик снаряда на начальном этапе выстрела// Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1999. № 9. С. 43–78.

Поршнев С. В. Оценка возможности использования непрерывного вейвлет-преобразования для обработки широкополосного частотномодулированного сигнала. Журнал радиоэлектроники, № 1, 2003.

Прилуцкий Р.Е. Методика и программные средства статистического анализа флуктуаций космических лучей. Препринт ИЗМИРАН No 41(795). 1988. 26 с.

Распопов О.М., Шумилов О.И., Касаткина Е.А.: 1998. Космические лучи как главный фактор влияния солнечной variability на климатические параметры. Биофизика. Т.43, №5, С. 902–908.

Распопов О.М., Дергачев В.А. Долговременные вариации солнечной активности как стимулятор резких климатических изменений. Материалы международной конференции «50-летие Международного геофизического года и Электронный геофизический год». 16–19 сентября 2007 Суздаль, Россия. 2007. ГЦ РАН, Москва, doi:10.2205/2007-IGY50conf.

Распопов О.М., Дергачев В.А., Колстрем Т. Вариации космических лучей и климатические изменения на высоких широтах в по-

следние 500 лет. Известия Российской академии наук. Серия физическая. М.: Академиздатцентр «Наука» РАН. Т. 69. № 6. 2005. с. 893–895.

Стожков Ю.И. Космические лучи и атмосферные процессы, причины изменения климата. Лекции БШФФ-2007. 2007. с. 56–60.

Хорозов С. В., Будовый И.И., Медведев В.А., Белоголов В.С. Колебания солнечной активности – основной климатообразующий фактор в масштабе тысячелетия. Калининград: HSoft. 2009. с. 26–31.

Чуи К. Введение в вейвлеты. М.: Мир, 2001.

Benestad, R.E., *Solar Activity and Earth's Climate*, Springer, Praxis Publish. Ltd., UK, 2006.

Beer, J., Blimov, A., Bonani, G, Hofman, H.J. and Finkel, Nature 347, 164, 1990

DeMaria, M., Balk, J.-J. & Kaplan, J. J. Atmos. Sci. 50, 1133–1147 (1993).

Elsner, J. B., Kara, A. B., «Hurricanes of the North Atlantic Climate and Society», New York, Oxford University, 1999

Elsner J. B. and S. P. Kavlakov, Atmosph. Science Letters, 2. 86-93. 2001.

Grinsted, A., J. Moore, and S. Jevrejera, Nonlinear Process, Geophys. 11, 561566 (2004).

Grossman A., Morlet J. SIAM Journal Mathematics Analysis. 1984. Vol. 15. P. 723.

Gulinsky O.V., Dorman L.I., Kaminer N.S., Libin I.Ya., Prilutsky R.E., Yudakhin K.F., Steglik M., Otaola J., Perez-Peraza J.: 1988. Large-scale cosmic ray fluctuations inferred from ground based neutron and ionizing component observations and their relevance's to cosmic ray anisotropy. Geofisica International. V.27. № 2. P. 403–417.

Hodges, R.E. and Elsner, J. B., Evidence linking solar variability with US hurricanes, International journal of Climatology, DOI: 10.1002/joc.2196, Article first published online: 14 JUL 2010.

Hudgins, L., Friehe, C and Mayer, M. E. Phys. Rev. Lett. 71, 3279–3282 (1993).

Husar, R.B., J.M. Prospero, and L. L. Stowe, J. Geophys. Res. 102, 16889 (1997).

- Kavlaikov S. P, Intern., J. Modern Physics., 20(29), 6699-6701, 2005.
- Kavlaikov, S., Elsner, J.B., Pérez-Peraza, J. Proc. 30th ICRC Mérida. Vol. 1 (SH), p. 693–696, 2008a.
- Kavlaikov, S., Elsner, J.B., Proc. 30th ICRC Mérida, Vol. 1 (SH), p. 697–700, 2008b.
- Kavlaikov, S., Elsner, J.B. and Perez-Peraza, J., Geofisica Internacional 47, 207–213 2008c.
- Khorozov, S. V., V. I. Budovy, I. M. Martin, V. A. Medvedev and V. S. Belogolov, COSPAR, Beijing , TCI- 0232; C4.2-0056-06, 2006.
- Lassen K., Friis-Christensen. Variability of the solar cycle length during the past five centuries and the apparent association with terrestrial climate // J. Atmos. Terr. Physics. 1995. – V. 57. – N 8. – P.835–845.
- Libin I.Ya., Pérez-Peraza, J., Leyva, A., Formichev, V. Guschina, R.T., Yudakhin, K., Jaani, A.: 1997. Simulating the mechanism of the action of heliophysical parameters on atmospheric processes in Earth. Geofisica Internacional 36–4, 1997. p.245–280.
- Libin I.Ya., Jaani A., Mikalajūnas M., Perez-Peraza J., Sizova O.V.: 2009. Assessment of the state of natural water resources and prediction of their dynamics in nearest decades. Annales Geographicae. V. 42 (1–2), P.224–240.
- McCracken, K.G., Proc. of 27th ICRC, Hamburg, Germany, Copernicus Gesellschaft, 4129-4132, 2001.
- McCracken, K. G., and. McDonald , F. B 27th ICRC 2001, Hamburg, Germany, Copernicus Gesellschaft, 3753-3756, 2001,
- McCracken, K. G., Beer, J. and. McDonald, F. B Advances in Space Research 34(2), , P.s 397-406, 2004.
- Misiti, M.Y. Misiti, G. Oppenheim, J.-MI Poggi, Wavelet Toolbox User's Guide, The MathWorks Inc, 2001.
- Pérez-Peraza, J ., V. Velasco, and S. Kavlaikov, Geofisica Internacional 47, 231– 244 2008b.
- Pérez-Peraza, J. et al, 30th ICRC, Merida, Mexico, Vol. 1 (SH), p. 785–788 , 2008c
- Polygiannakis, J., Preka-Papadema, P., and Moussas, X., Mon. Not. R. Astron.Soc., 343, 725–734, 2003.
- Prospero, J.M., Schmitt, R., Cuevas, E., Savoie, D.L., Graustein, W.C., Turekian, K.K., Volz-Thomas, A., Diaz, A., Oltmans, S.J., Levy, II,

H., Geophys. Res. Lett. 22, 2925–2928, 1995.

Prospero J.M. and T.N. Carlson, Pure Appl. Geophys 119, 677 – 691 (1981).

Prospero, J.M and R.T. Nees, Nature 320, 735-738 (1986).

Prospero, J.M., Journal of Geophysical Research 104(D13):15,917–15,927, 1999

Prospero, J.M. ,P. Ginoux, O. Torres, S. Nicholson, and T. Gill, Rev. Geophys. 40, 1002 (2002).

Prospero J.M , and P. J. Lamb, Science 302, 1024 – 1027 (2003).

Prospero, J. M., Oceanography Vol. 19, No. 2, June 2006.

Prospero, J.M., Schmitt, R., Cuevas, E., Savoie, D.L., Graustein, W.C., Turekian, K.K., Volz-Thomas, A., Diaz, A., Oltmans, S.J., Levy II, H., Geophys. Res. Lett. 22, 2925–2928. 1995.

Ram and Stolz (2009). EOS, Trans AGU, RAN, Vol 90, 44, 3 Nov. 2009)

Raspopov, O. M., O. I. Shumilov, E. A. Kasatkina, E. Turunen, M. Lindholm and T. Kolstrom,. Geomagnetism and Aeronomy 41(3), 407, 2001.

Raspopov, O.M., Dergachev, V.A. and Kolstrom, T., Solar Physics 224, 455, doi10.1007/s11207-005-5251-8, 2005.

Shanahan, T.M. , J.T. Overpeck, K.J. Anchukaitis, J.W. Beck, J.E. Cole, D.L. Dettman, J.A. Peck, C.A. Scholz, and J.W. King, Science 324, 377–380 (2009).

Stozhkov Y. I., V. P. Okhlopkov and N. S. Svirzhevsky,. Solar Phys. 224(1), 323, 2004

Stozhkov, Y. I., Bulletin of the Lebedev Physical Institute 34(5), 135, 2007

Torrence C, Compo G. 1998. Bull Am. Meteorol Soc 79, 61–78, 1998

Torrence, C. and P. Webster, J. Clim. 12, 2679–2690. (1999).

Usokin, Ilya G., Schüssler, M., Solanki, S. and Mursula K., J. Geophys. Res. 110, A101102, doi: 10.1029/2004JAA010946, 2005.

Usokin, I. G and Kovaltsov, G., Review Paper, Comptes Rendus Geoscience, doi: 10.1016/j.crte.2007.11.001, 2007

Velasco Herrera, Pérez-Peraza, J., Velasco Herrera, G Luna González, L., Los Alamos Laboratories Series, arXiv:1003.4769v1 [physics.ao-ph], p.1- 5, 2010.

Wagner, G., J. Beer, C. Laj, C. Kissel, J. Masarik, R. Muscheler, and H.A. Synal, Chlorine-36 evidence for the Mono Lake event in the Summit GRIP ice core, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 181,1-6, 2000.

Yoshimura, H., *Astrophys. J.* 227, 1047, 1979