

Методика изучения структуры радиотеплового поля Земли, основанная на процедуре Такенса

Н.М. Астафьев, М.Д. Раев, Г.Р. Хайруллина

Институт космических исследований РАН, (ИКИ РАН)
117997 Москва, Профсоюзная 84/32
E-mails: ast@iki.rssi.ru

Межгодовые колебания радиотеплового поля Земли изучаются на основе данных микроволнового спутникового мониторинга на частотах, содержащих информацию о распределении влаго- и водозапаса тропосферы (по ежесуточным радиотепловым полям из электронной коллекции ИКИ РАН GLOBAL-Field, <http://www.iki.rssi.ru/asp>). Анализ пространственно-временной структуры радиотеплового поля проведен с помощью методики, основанной на процедуре Такенса. Идея анализа случайных сигналов с целью реконструкции свойств порождающих их источников (процессов), впервые изложенная в (Takens F. Lect. Notes Math. 1981. №899. Р. 366–381) и развитая в (Grassberger P., Procaccia I. Phys. Rev. Lett. 1983. V. 50. №5. Р. 346–349), состоит в построении диагностики на основе анализа конкретной достаточно длинной, но конечной временной реализации исследуемого физического процесса. В настоящей работе представлена методика, основанная на процедуре Такенса, и результаты ее применения для анализа пространственно-временной структуры радиотеплового поля Земли. С помощью предлагаемой методики (и фильтрации разных временных масштабов – меньше года и годовых) изучены межгодовые изменения радиотеплового поля. Выявлена широтная структура годовых циклов и квазидвухлетних колебаний в тропосфере. Сравнение с результатами, полученными другими методами (вейвлет-преобразование, в частности) показало хорошее согласие результатов и эффективность методики, основанной на процедуре Такенса.

Ключевые слова: межгодовые колебания, тропосфера Земли, микроволновый спутниковый мониторинг, глобальное радиотепловое поле, процедура Такенса.

Традиционные методы анализа данных натурных наблюдений, результатов физического и численного эксперимента, порождаемых динамическими системами временных рядов и др. чаще всего базируются на классических методах анализа: спектральном, корреляционном и статистических методах. При этом при статистическом подходе к анализу сигналов обычно трудно что-либо сказать об источнике, породившем сигнал. Методы современной нелинейной динамики позволяют, анализируя сигнал, идентифицировать порождающий его процесс (или описывающую его динамическую систему).

Идея анализа случайных сигналов с целью реконструкции свойств порождающих их источников (процессов) впервые изложена Такенсом в (Takens, 1981). Такенс исходил из того, что если хаотический сигнал генерируется конечномерной динамической системой, то возможно вначале восстановление соответствующего предельного множества (в частности, странного аттрактора) в некотором фазовом пространстве, затем определение на этом множестве таких характеристик, как энтропия, спектр размерностей и др. и, в дальнейшем, свойств порождающего процесса. Развитие и практическое воплощение идеи Такенса осуществлено Грассбергером и Прокаччи и опубликовано в (Grassberger & Procaccia, 1983). Авторы предложили строить всю диагностику исходного процесса только на основе анализа конкретной достаточно длинной, но конечной временной реализации исследуемой физического процесса.

Согласно идеи Такенса, имея элементы временного ряда $x(t)$, путём правильного подбора размерности m и параметра задержки τ можно получить $(m+1)$ -мерный фазовый образ z , достаточно полно отражающий свойства истиной траектории динамической системы в фазовом пространстве. Уравнение этой траектории может быть записано в виде $z(i+1) = x(t + i\tau)$, где $(i+1)$ – номер координаты реконструированного фазового пространства $Z = \{z(1), \dots, z(i+1)\}$, а параметр i принимает целочисленные значения от 1 до m . После работ Такенса та же самая идея часто фигурирует под разными названиями – реконструкция аттрактора, реконструкция фазового пространства или динамической системы,

прогнозирование методами нелинейной динамики. Размерность сложных процессов часто (Малинецкий, Потапов, 2000; Doyle, 1997) находится в пределах от $m = 3$ до $m = 6$ (т.е. размерность соответствующих фазовых образов – от 4 до 7). Вычисление размерности фазового образа по временному ряду представляет значительный интерес, поскольку это одна из немногих характеристик, которую можно оценить по временному ряду и получить таким образом сведения о свойствах динамической системы, – т.е. непосредственно в результате анализа экспериментальных или натурных данных. Размерность позволяет оценить (обычно снизу) минимальное число значимых динамических переменных, которое должна включать соответствующая математическая модель (и необходимых для описания процесса, породившего анализируемый сигнал – временной ряд). Решениями динамической системы (системы обыкновенных дифференциальных уравнений) могут быть: состояние равновесия, устойчивое периодическое решение, квазипериодическое и хаотическое решения.

Как правило, данные наблюдений за изменениями природных процессов (временные ряды) имеют сложную структуру, поскольку формируются в результате взаимодействия многих физических процессов, часто нелинейного. Анализ натурных временных рядов вызывает принципиальные трудности, связанные с тем, что неизвестно, какой именно математической моделью они (натурные данные и породившие их физические процессы) могут быть описаны. Преимущество применения методов нелинейной динамики состоит в том, что по результатам анализа структуры одного временного ряда можно судить об эволюции всей системы, его породившей.

В настоящей работе на основе методов нелинейной динамики изучены временные ряды радиояркостной температуры, выбранные из серий глобальных радиотепловых полей из электронной коллекции ИКИ РАН GLOBAL-Field (<http://www.iki.rssi.ru/asp/>), на частотах, содержащих информацию о распределении влаго- и водозапаса тропосфера. Поля радиояркостной температуры *Tr* из электронной коллекции GLOBAL-Field построены по полосовым данным спутников программы DMSP (Defense Meteorological Satellite Program, <http://dmsp.ngdc.noaa.gov/dmsp.html>) с помощью алгоритма межвиткового и кросс-аппаратного выравнивания и дополнения (Астафьева и др., 2006). Электронная коллекция GLOBAL-Field содержит по 2 полных поля в сутки, с плотностью покрытия $0,5 \times 0,5$ градусов по поверхности Земли за период 1995–2011 гг. Установленные на аппаратах серии DMSP радиометры SSM/I (Special Sensor Microwave / Imager) регистрируют излучение на частотах, несущих информацию о влаго- и водосодержании атмосферы. Самый нижний и наиболее плотный слой атмосферы – тропосфера – содержит более 95% водяного пара, молекулы которого интенсивно поглощают инфракрасные лучи во всем диапазоне, за исключением «окна» на длинах волн 8–13 мкм. Пар переносится и контролируется крупномасштабными и мелкомасштабными движениями воздуха, поскольку влага вморожена в движения воздуха. В результате, на суточных радиотепловых полях области повышенного влаго- и водосодержания являются отпечатками пространственно-временной динамики атмосферы.

В настоящей работе предлагается методика анализа временных рядов, основанная на процедуре Такенса. Структура радиотепловых полей над акваториями Мирового океана исследуется методом реконструкции фазового пространства, основанным на процедуре Такенса, и с помощью различных способов сглаживания данных (фильтрации разных временных масштабов – меньше года и годовых). Предлагаемая методика позволила изучить широтную структуру межгодовых колебаний, годовых циклов и квазидвухлетних колебаний в тропосфере Земли.

Методика изучения полей радиояркостной температуры, основанная на процедуре Такенса

Глобальные радиотепловые поля из электронной коллекции GLOBAL-Field содержат по 2 полных поля в сутки, с плотностью покрытия $0,5 \times 0,5$ градусов по поверхности Земли.

Каждое поле представляет собой двумерный массив чисел Tr (широта, долгота) = $Tr(2*180, 2*360) = Tr(360, 720)$. Коллекция за период 1995–2011 гг. содержит $17*365*2 = 12410$ таких матриц ежесуточных значений радиояркостной температуры $Tr(360, 720)$. С помощью предлагаемой в настоящей работе методики изучается структура временных рядов $Tr(t) = Tr(12410)$.

Методика анализа временных рядов, основанная на процедуре Такенса, построена на методе задержки. Он состоит в построении и исследовании кривых в фазовом пространстве по временному ряду радиояркостной температуры: значения $\langle Tr \rangle$ рассматриваются в дискретные моменты времени $t, t+\tau$; эти значения описывают координату точки в двумерном пространстве, соответствующую моменту t , здесь τ – параметр задержки.

Предлагаемая методика реконструкции фазового пространства методом задержки и изучения свойств кривых в фазовом пространстве, состоит в следующем.

1. Программным образом выбирается временной ряд радиояркостной температуры $Tr(t)$ за определенный период времени в заданной точке или области любой формы, задаваемой ее границей (с усреднением радиояркостной температуры по области).
2. В случае необходимости проводится обычное усреднение данных по времени или скользящее усреднение $\langle Tr(t) \rangle$ с заданным периодом сглаживания (основанное на методе скользящего среднего). Скользящее усреднение является одним из эффективных инструментов сглаживания временных рядов и заключается в обычной замене значений членов временного ряда на среднее арифметическое по заданному периоду. Выбор периода сглаживания зависит от характера временного ряда и целей исследования.
3. Полученная последовательность значений $\langle Tr(t) \rangle$ отображается в двумерное фазовое пространство так, чтобы каждое значение данного временного ряда отображалось в точку этого пространства с координатами ($\langle Tr(t) \rangle, \langle Tr(t+\tau) \rangle$), соответствующую моменту времени t , и заданному параметру задержки τ .
4. Предусмотрено построение фазовых кривых ($\langle Tr(t) \rangle, \langle Tr(t+\tau) \rangle$) в виде проекций на плоскость ($\langle Tr \rangle, \langle Tr \rangle$), а также в фазовом пространстве ($\langle Tr \rangle, \langle Tr \rangle, t$).
5. Изучаются геометрические характеристики полученных в фазовом пространстве кривых (например, изменение контрастности годового цикла).

Построение проекций кривых ($\langle Tr(t) \rangle, \langle Tr(t+\tau) \rangle$) в фазовом пространстве

Пример реконструкции фазового пространства по значениям временного ряда $\langle Tr(t) \rangle$ с 6-месячным сглаживанием по данным за период 1999–2006 гг. представлен на рис. 1 слева. Кривые на рисунке представлены в фазовой плоскости ($\langle Tr \rangle, \langle Tr \rangle$). Параметр задержки τ в этом случае и далее в статье равен одному месяцу. Для сравнения на том же рисунке справа показана реконструкция фазового пространства по значениям гармонической функции $\sin(t)$ с параметром задержки $\tau = \pi/12$.

На рис. 1 справа наблюдаем замкнутый цикл, слева – почти замкнутые годовые циклы (каждый годовой цикл окрашен своим цветом, точками отмечено начало каждого месяца). Структура фазовых кривых на рисунках справа и слева качественно схожа, что свидетельствует о квазигармоническом, почти синусоидальном поведении годовых циклов радиояркостной температуры в грубом приближении.

На рис. 2 представлены те же фазовые кривые, что и в левой части рис. 1, но только отдельными годовыми циклами за каждый год от 1999 до 2005 гг.

На рис. 2 хорошо выражены годовые циклы $\langle Tr(t) \rangle$. Наблюдаются изменения наибольшего значения $\langle Tr(t) \rangle$ во влажный летний период и наименьшего значения $\langle Tr(t) \rangle$

в сухой зимний период от года к году. Соответствующий размах колебаний – разницу между наибольшим и наименьшим значением $\langle Tr(t) \rangle$ – назовем для удобства «длиной» годового цикла. Отметим не менее значительное изменение размаха колебаний $\langle Tr(t) \rangle$ между значениями в осенний и весенний периоды, назовем «ширина» годового цикла.

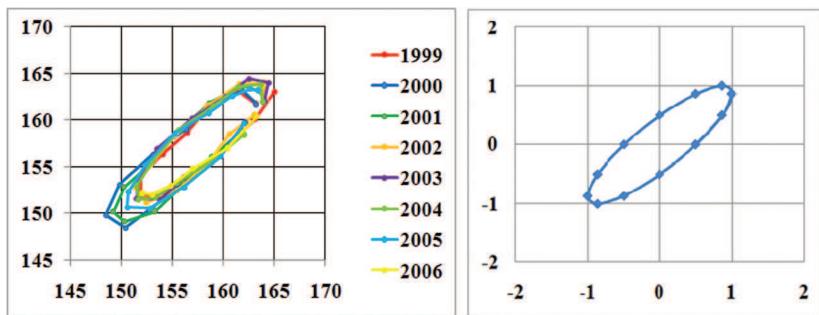


Рис. 1. Кривые в фазовом пространстве, построенные по данным $\langle Tr \rangle$ со скользящим 6-месячным осреднением (слева) и функции $\sin(t)$ (справа)

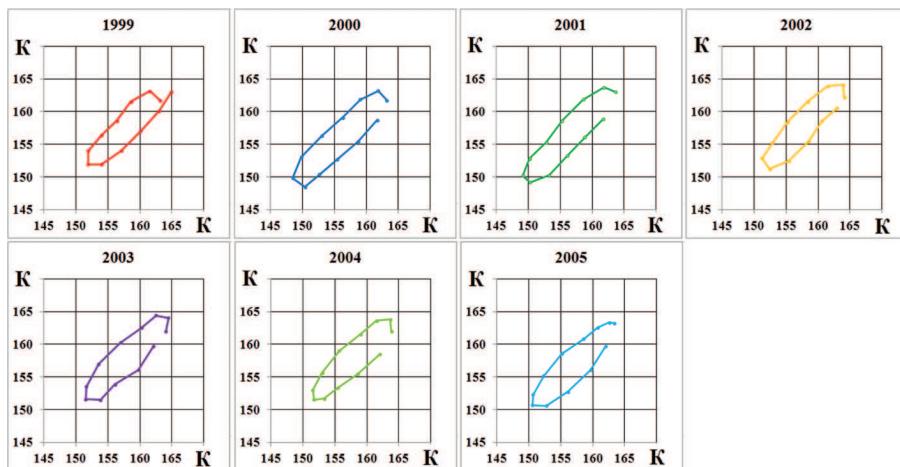


Рис. 2. То же, что на рис. 1 слева, но отдельными годовыми циклами

Построение кривых ($\langle Tr(t) \rangle$, $\langle Tr(t+\tau) \rangle$) в фазовом пространстве ($\langle Tr \rangle$, $\langle Tr \rangle$, t)

По значениям $\langle Tr(t) \rangle$ на разных широтах Атлантики (с усреднением по долготе на заданной широте и со скользящим 6-месячным осреднением) за период 1999–2006 гг. проведена реконструкция кривых в фазовом пространстве ($\langle Tr \rangle$, $\langle Tr \rangle$, t). На рис. 3 представлены полученные в пространстве ($\langle Tr \rangle$, $\langle Tr \rangle$, t) годовые циклы на широтах 0, 15, 30° с.ш. (верхний ряд) и на широтах 5, 10, 30° ю.ш. (нижний ряд); широта указана в правом верхнем углу каждого рисунка. На всех широтах каждый годовой цикл окрашен своим цветом, черными точками отмечено начало каждого года. Серым цветом показаны проекции фазовых кривых на плоскость ($\langle Tr \rangle$, $\langle Tr \rangle$).

Аналогичные кривые построены по данным на всех широтах, на рис. 3 представлены лишь наиболее характерные из них. Можно видеть хорошо выраженные годовые циклы, а также межгодовые изменения – изменение длины годового цикла от года к году и от широте к широте, например.

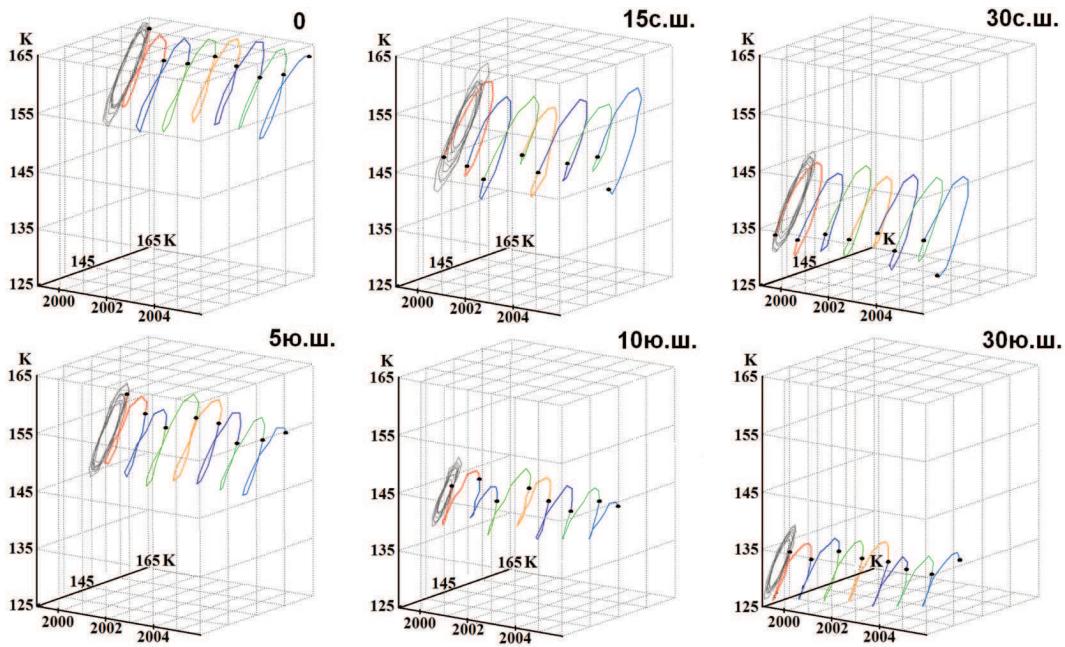


Рис. 3. Кривые в фазовом пространстве, построенные по данным $\langle Tr \rangle$ со скользящим 6-месячным осреднением (на указанных широтах)

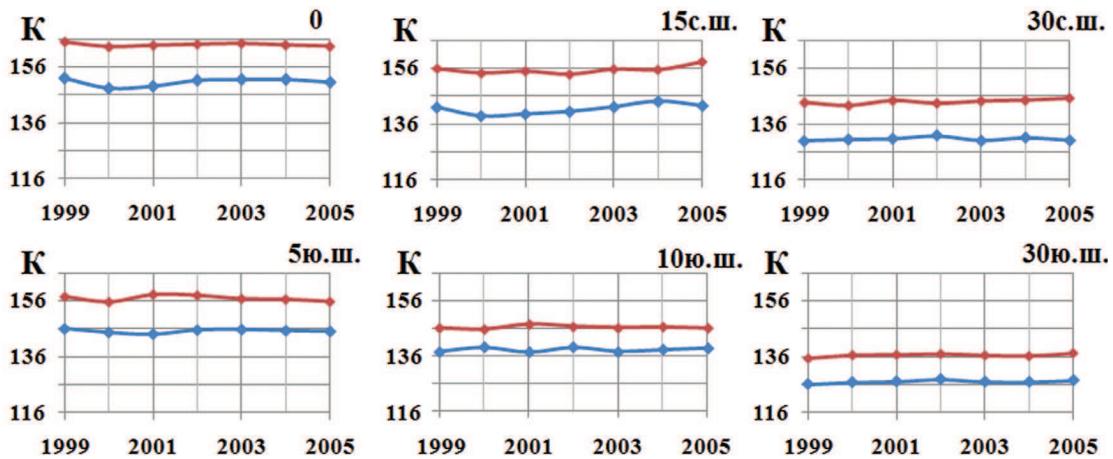


Рис. 4. Изменение наибольшего и наименьшего значений $\langle Tr \rangle$ со скользящим 6-месячным осреднением, на указанных широтах; верхняя кривая соответствует летнему периоду, нижняя – зимнему

На рис. 4 приведены кривые изменения наибольшего (во влажный летний период) и наименьшего (в сухой зимний период) значений $\langle Tr(t) \rangle$ со скользящим 6-месячным осреднением от года к году на широтах, указанных в правом верхнем углу каждого рисунка.

Отметим изменение наибольших и наименьших значений $\langle Tr(t) \rangle$ от года к году и от широте к широте. На широте 0° с.ш. амплитуда $\langle Tr(t) \rangle$ в летний период меняется по времени меньше, чем амплитуда $\langle Tr(t) \rangle$ в зимний период – более стабильная летняя температура характерна для субэкваториальных широт. На широте 30° ю.ш. амплитуда $\langle Tr(t) \rangle$ в летний и зимний периоды почти не меняется – это характерно для субтропических и умеренных широт обоих полушарий. На тропических широтах обоих полушарий в летний и зимний периоды наблюдаются изменения значений $\langle Tr(t) \rangle$ как одного, так и разных знаков.

На рис. 5 представлено изменение длины годовых циклов (разница между наибольшим и наименьшим значениями $\langle Tr(t) \rangle$) от года к году на указанных широтах.

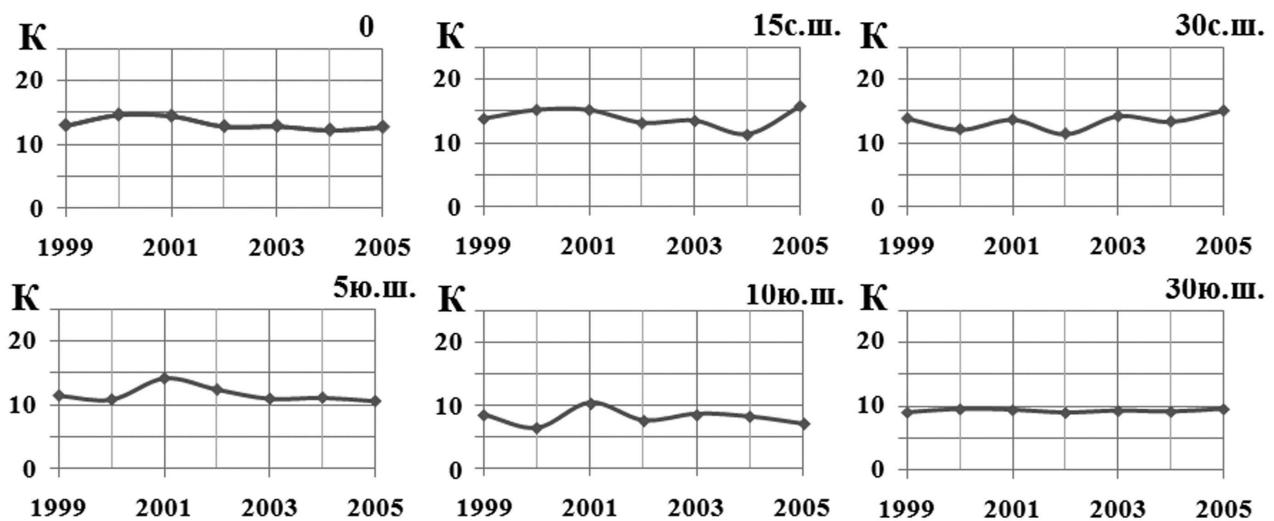


Рис. 5. Изменение длины годовых циклов на тех же широтах, что и на рис. 4

Сравнение длины годовых циклов на каждой широте Атлантики показало, что максимальная длина годового цикла наблюдается на субэкваториальной широте в 2000–2001 гг.; в Северном полушарии в тропическом поясе на 15° с.ш. – в 2000–2001 и 2005 гг., на 30° ю.ш. – в 1999, 2001 и 2003, 2005 гг.; в Южном полушарии на тропических широтах можно видеть ярко выраженный максимум в 2001 г.

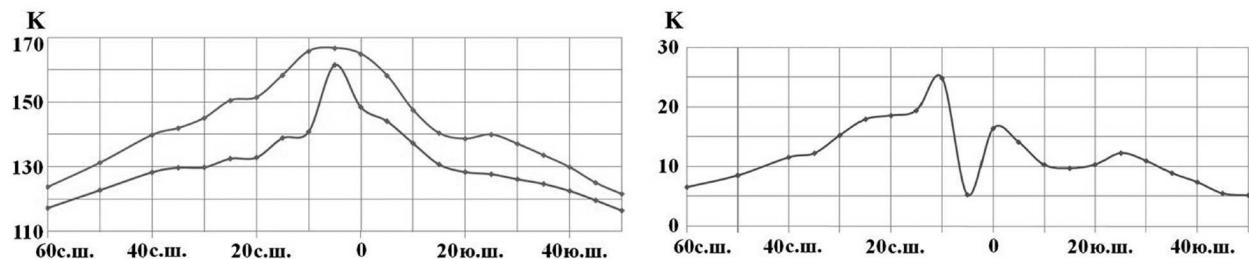


Рис. 6. Зависимость от широты наибольшего и наименьшего значения $\langle Tr \rangle$ со скользящим 6-месячным осреднением (слева) и разницы между этими значениями (справа)

На рис. 6 слева приведены кривые изменения наибольшего (во влажный летний период) и наименьшего (в сухой зимний период) значений $\langle Tr(t) \rangle$ за исследуемый период времени на каждой широте над Атлантическим океаном (через 5 градусов); изменение разницы между этими значениями представлено справа.

На рис. 6 слева верхняя кривая соответствует изменению наибольшего значения $\langle Tr(t) \rangle$ в летний период, нижняя — изменению наименьшего значения $\langle Tr(t) \rangle$ в зимний период. На рисунке наблюдаются максимальные значения верхней и нижней кривых на широте 5° с.ш. и почти равномерный спад от 5° с.ш. в обоих полушариях. На рис. 6 справа наблюдаются минимальное значение на 5° с.ш., равномерный спад от 10° с.ш. в Северном полушарии и от 5° ю.ш. в Южном полушарии. Положительные экстремумы кривых на рисунке слева и отрицательный экстремум кривой на рисунке справа на широте 5° с.ш. объясняется тем, что вблизи этой широты над Атлантикой практически в течение всего года располагается зона внутритропической конвергенции с ее высокой влажностью. Анализируемые данные радиояркостной температуры несут информацию о влаго- и водозапасе тропосферы. Диапазоны широт 5–60° с.ш. и 5° с.ш.–50° ю.ш. находятся по разные стороны климатического экватора.

Выше представлены (см. рис. 3) фазовые кривые на широтах с наиболее характерной структурой. На рис. 7 показана такая же фазовая кривая, полученная на широте 5° с.ш., являющейся исключением, поскольку вблизи этой широты над Атлантическим океаном располагается зона внутритеческой конвергенции, т.е. фактически эта широта является климатическим экватором.

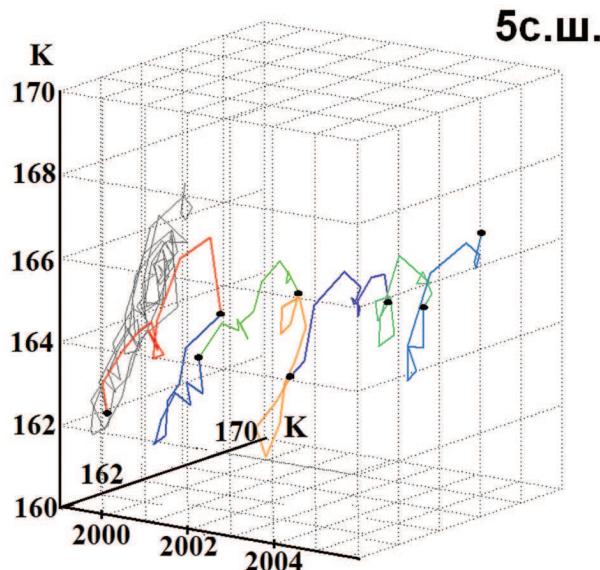


Рис. 7. Фазовая кривая, построенная по данным $\langle Tr \rangle$ со скользящим 6-месячным осреднением, на широте 5° с.ш.

На рисунке части кривой продолжительностью в один год окрашены своим цветом, черными точками отмечены границы между ближайшими годами. Серым цветом представлена проекция кривой на плоскость ($\langle Tr \rangle, \langle Tr \rangle$).

На широте 5° с.ш. годовые циклы, ярко выраженные на остальных широтах (см. рис. 3), не наблюдаются. Это объясняется тем, что климатический экватор (совпадающий с внутритеческой зоной конвергенции) находится над Атлантикой примерно на широте $3-5^{\circ}$ с.ш. (перемещается в зависимости от сезона года). На широте 5° с.ш. «складываются» разные сезоны года Северного и Южного полушарий.

Сравнение с результатами, полученными на основе математического аппарата вейвлет-преобразования

На рис. 8 представлены кривые, реконструированные по значениям $\langle Tr(t) \rangle$ со скользящим 12-месячным осреднением, за период 1999–2005 гг. в фазовом пространстве ($\langle Tr \rangle, \langle Tr \rangle, t$) на широтах $15, 30^{\circ}$ с.ш. и 20° ю.ш.; широта указана на каждом рисунке. На всех широтах каждый цикл окрашен своим цветом, черными точками отмечены границы между ближайшими годами. Серым цветом показаны проекции фазовых кривых на плоскость ($\langle Tr \rangle, \langle Tr \rangle$).

Построены фазовые кривые по значениям $\langle Tr(t) \rangle$ со скользящим 12-месячным осреднением на всех широтах над Атлантическим океаном. Анализ структуры на разных широтах выявил квазидвухлетние колебания в диапазонах $5-60^{\circ}$ с.ш. и $10-60^{\circ}$ ю.ш., квазичетырехлетние колебания в диапазоне 5° с.ш.– 10° ю.ш. В диапазонах широты $25-45^{\circ}$ с.ш. и $15-35^{\circ}$ ю.ш. прослеживаются почти однофазные КДК.

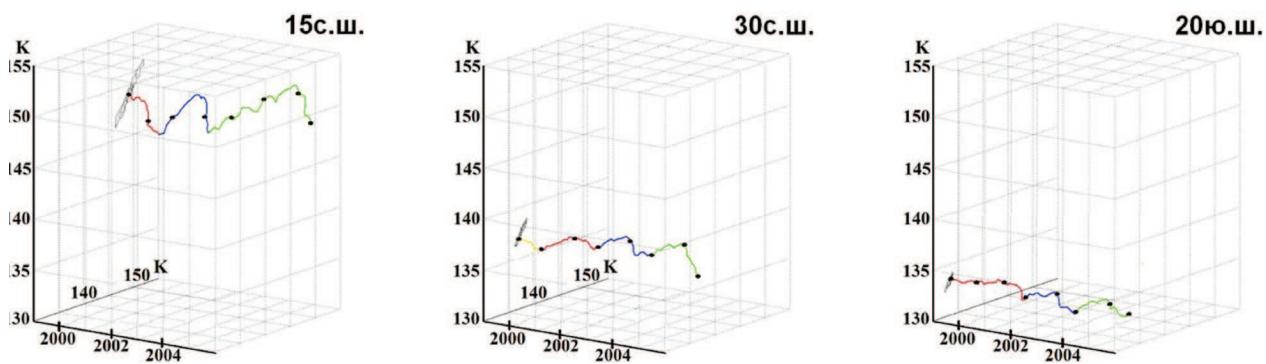


Рис. 8. Фазовые кривые, построенные по данным $\langle Tr \rangle$ со скользящим 12-месячным осреднением, на указанных широтах

Для сравнения ниже представлены результаты анализа временных рядов радиояркостной температуры на основе математического аппарата вейвлет-преобразования (Хайруллина, Астафьева, 2010). Вейвлет-преобразование состоит в разложении анализируемого множества по иерархическому базису, сконструированному из хорошо локализованной солитоноподобной функции посредством масштабных преобразований и переносов (Daubechies, 1991; Астафьева, 1996). В результате вейвлет-преобразования временного сигнала получается распределение его интенсивности в пространстве частот (масштабных преобразований) и времени (сдвигов). Вейвлет-преобразование одномерного ряда представляет собой двумерный массив значений коэффициентов, т.е. поверхность в трехмерном пространстве. Как показывает практика, иногда удобнее пользоваться проекцией поверхности на плоскость с изолиниями, позволяющими проследить изменение амплитуды коэффициентов преобразования на разных масштабах и во времени.

На рис. 9 представлены фрагмент глобального радиотеплового поля над Атлантическим океаном (справа), картины коэффициентов вейвлет-преобразования временного ряда, представляющего собой изменение $\langle Tr(t) \rangle$, усредненной по долготе и широте в 5-градусных широтных областях от 60° ю.ш. до 60° с.ш. над Атлантикой за период 1996–2004 гг. (в середине). Справа показаны графики сечения картин коэффициентов на масштабе 2 года. Картинки коэффициентов вейвлет-преобразования показаны в виде проекции на плоскость (время, временной масштаб); по оси абсцисс отложено время, по оси ординат – временной масштаб, линейно растущий вниз.

На картинах вейвлет-преобразования выделяются периодические структуры, связанные с годовым ходом радиояркостной температуры. Колебания в диапазонах 5–60° с.ш. и 5° с.ш.–60° ю.ш. противофазные, поскольку широтные диапазоны находятся по разные стороны климатического экватора, расположенного в Атлантике севернее географического примерно на 3–5 градусов в зависимости от сезона года. Анализ и сравнение межгодовых изменений $\langle Tr(t) \rangle$ во всех исследуемых 5-градусных широтных областях выявили широтные диапазоны, имеющие схожую структуру колебаний. В разных широтных диапазонах Северного и Южного полушарий на картинах вейвлет-преобразования как и на фазовых кривых наблюдаются квазичетырехлетние колебания в диапазоне 5° с.ш.–10° ю.ш.; квазидвухлетние – 5–60° с.ш. и 10–60° ю.ш., а также почти однофазные квазидвухлетние колебания – в 25–45° с.ш. и 15–35° ю.ш.

Методы, основанные на процедуре Такенса и вейвлет-преобразовании, выявляют квазидвухлетние колебания на всех широтах кроме экваториальной области, где наблюдаются квазичетырехлетние колебания. Результаты, полученные на основе двух разных методик, качественно схожи и для КДК и для более длинноволновых колебаний, что говорит об их эффективности для изучения структуры радиотеплового поля Земли.

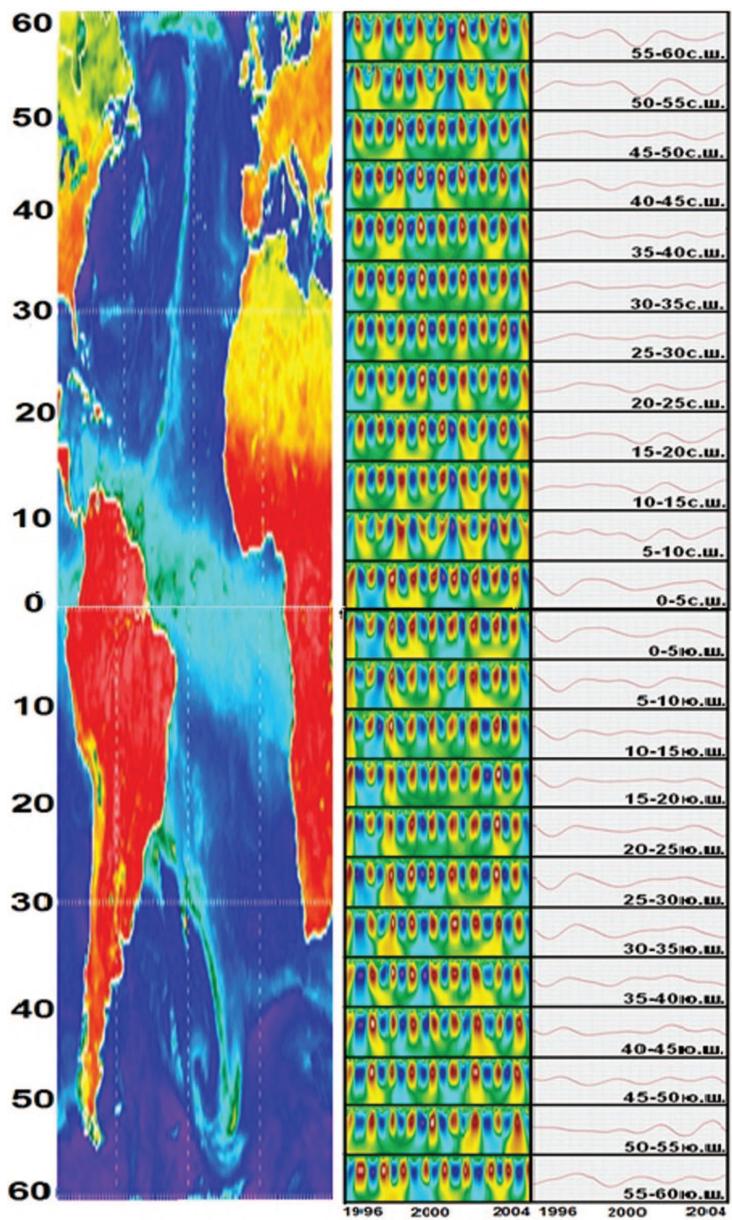


Рис. 9. Глобальное радиотепловое поле над Атлантикой (слева); картины коэффициентов вейвлет-преобразования $\langle Tr \rangle$ в 5-градусных широтных диапазонах (в середине) и графики сечения картин на масштабе 2 года (справа)

Таким образом, на основе методики, базирующейся на процедуре Такенса, проведен анализ данных микроволнового спутникового мониторинга – серий глобальных радиотепловых полей из электронной коллекции ИКИ РАН GLOBAL-Field (<http://www.iki.rssi.ru/asp/>). Показано, что методика позволяет исследовать временную структуру радиотепловых полей Земли, выявлены ее различия на разных широтах. Сравнение результатов изучения межгодовых изменений радиотеплового поля Земли, полученных на основе методики, базирующейся на процедуре Такенса, и на основе математического аппарата вейвлет-преобразования показало хорошее согласие и эффективность методики. Результаты, полученные на основе двух разных методик, подтвердили наличие выявленных ранее (Хайруллина, Астафьев, 2010, 2011а, 2011б) КДК в тропосфере Земли. Методика реконструкции фазового пространства, основанная на процедуре Такенса, может с успехом применяться для анализа сигналов любой физической природы, полученных в результате вычислений, лабораторного эксперимента или натурных наблюдений.

Литература

1. Grassberger P., Procaccia I. (1983) Characterization of Strange Attractors // Phys. Rev. Lett., 1983. V. 50. №5. P. 346–349.
2. Daubechies I. (1991) Ten lectures on wavelets // CBMS Lecture Notes Series. SIAM. Philadelphia. 1991. 136 p. (Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Москва – Ижевск, 2001).
3. Doyle J. F. A. (1997) Wavelet deconvolution method for impact force identification // Experimental Mechanics. 1997. V. 37. № 4. P. 403–408.
4. Takens F. (1981) Detecting strange attractors in turbulence // Lecture Notes in Mathematics, 1981. №899. P. 366–381.
5. Астафьев Н.М. (1996) Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук, 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.
6. Астафьев Н.М., Раев М.Д., Шарков Е.А. (2006) Глобальное радиотепловое поле системы океан – атмосфера по данным микроволновых космических комплексов // Исследование Земли из космоса. 2006. № 3. С. 64–69.
7. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. (2000) Современные проблемы нелинейной динамики. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 336 с.
8. Хайруллина Г.Р., Астафьева Н.М. (2010а) Квазидвухлетние колебания в структуре радиотеплового поля над Атлантическим океаном по данным микроволнового спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 53–61.
9. Хайруллина Г.Р., Астафьева Н.М. (2011а) Широтно-временная структура квазидвухлетних колебаний радиотеплового поля (тропосфера) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011. Т. 8. № 1. С. 271–279.
10. Хайруллина Г.Р., Астафьева Н.М. (2011б) Квазидвухлетние колебания радиотеплового поля тропической зоны Атлантики // Исследования Земли из космоса, 2011. № 4. С. 78–84.

The method of studying of structure of a radio thermal field of the Earth based on Takens procedure

G.R. Khairullina, N.M. Astafieva

Space Research Institute of RAS (IKI RAS)
117997 Moscow, Profsoyuznaya 84/32
E-mails: x.g.r@list.ru, ast@iki.rssi.ru

Interannual oscillations of a radio thermal field of the Earth are studied on the basis of data of microwave satellite monitoring on the frequencies containing the information on distribution of a troposphere moisture and water stock (on daily radio thermal fields from electronic collection of Space Research Institute of RAS GLOBAL-Field, <http://www.iki.rssi.ru/asp>). The analysis of existential structure of a radio thermal field was performed by using the method based on Takens procedure. The idea of the analysis of random signals for the purpose of reconstruction the properties of the sources (physical processes) generating them, for the first time set forth in (Takens F. Lect. Notes Math. 1981. № 899. P. 366–381) and developed in (Grassberger P., Procaccia I. Phys. Rev. Lett. 1983. V. 50. № 5. P. 346–349), is to construct a diagnostic of the physical process on the basis of the analysis of a long enough, but the final time realization of the investigated physical process. The study presents the method based on Takens procedure and results of its application for the analysis of existential structure of a radio thermal field over Atlantic ocean. Interannual oscillations of a radio thermal field are studied by using the offered method (and the filtration of different time scales, less than a year and annual). There are revealed latitudinal structure of the annual cycle and the quasi-biennial oscillations in the troposphere. Comparison with the results obtained by other methods (wavelet transform, in particular) showed the efficiency of the technique and good agreement.

Keywords: interannual oscillations, troposphere of the Earth, microwave satellite monitoring, global radio thermal field, Takens procedure.