

Широтно-временная структура квазидвухлетних колебаний радиотеплового поля (тропосфера)

Г.Р. Хайруллина, Н.М. Астафьева

Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН)

117997, Москва, Профсоюзная, 84/32

E-mail: x.g.r@list.ru, ast@iki.rssi.ru

Изучаются межгодовые колебания тропосферы и, в особенности, квазидвухлетние (КДК). В отличие от большинства исследований, посвященных КДК зонального ветра в экваториальной стратосфере, исследуются колебания радиотеплового поля Земли на частотах, содержащих информацию о распределении влаго- и водозапаса тропосферы. Показано, что КДК, являющиеся важнейшим процессом экваториальной стратосферы, характерны и для радиотеплового поля в микроволновом диапазоне, т. е. для тропосферы. Структура радиотепловых полей над Атлантическим океаном изучается с помощью различных способов сглаживания и регрессионного анализа, что позволило выявить широтную структуру межгодовых колебаний в тропосфере и основные тенденции (тренды) радиотеплового поля. Показано, что, КДК проявляются в очень важной для тропического циклогенеза характеристики – в интегральном влагозапасе тропосферы, что свидетельствует скорее о наличии связи между КДК и тропическим циклогенезом (которая некоторыми исследователями оспаривается), чем о ее отсутствии.

Ключевые слова: общая циркуляция атмосферы, квазидвухлетние колебания, микроволновый спутниковый мониторинг, глобальное радиотепловое поле, тропический циклогенез.

Квазидвухлетние колебания (КДК) – одно из хорошо известных межгодовых атмосферных колебаний, механизм формирования которых еще окончательно не выяснен, и наиболее значимая из высокочастотных квазирегулярных компонент межгодовых колебаний атмосферы и климата Земли. КДК могут отражать как глобальные климатические изменения, так и локальные структурные особенности климатической системы Земли, поскольку они проявляются в структуре различных атмосферных и климатических параметров: в скорости зонального ветра, в распределении озона, температуры и давления воздуха, облачности и др. КДК модулируют планетарные волны и оказывают влияние на атмосферную ситуацию средних широт; действуют на процессы генерации и общую циркуляцию озона и других примесей в атмосфере; а также взаимодействуют с таким важным для системы океан – атмосфера (и климатической системы) явлением, как Южное Колебание – Эль-Ниньо (ЮКЭН).

КДК зонального ветра наблюдаются над тропическими широтами (с максимумом амплитуды над экватором) и над средними широтами (здесь амплитуда КДК мала). Основные свойства КДК зонального ветра: экваториальный захват; меняющийся период ~24–30 мес; зона распространения ~100–1 Мб (16–50 км) с максимумами амплитуды зональной скорости ~ 30 м/с на высотах ~20–10 Мб; медленное опускание фаз колебаний со скоростью порядка 1 км/мес. КДК зонального ветра непосредственно связаны с аналогичными колебаниями температуры тропической стратосферы – КДК тропической температуры являются результатом баланса между термическим ветром и вертикальным сдвигом зонального ветра (*Andrews et al.*, 1987).

Исследование межгодовой изменчивости распределения температуры у поверхности, а также в тропосфере и стратосфере с анализом тенденций эволюции этих характеристик

при изменении термического режима климатической системы показало, что КДК температуры достаточно четко проявляются в средних и высоких широтах и амплитуды КДК температуры воздуха во внутропических и тропических широтах вполне сопоставимы (*Mokhov et al.*, 1994, 1995; *Мохов и др.*, 1997). Анализ КДК приповерхностной температуры выявил связь интенсивности КДК и амплитуды годового хода температуры. При этом КДК приповерхностной температуры в целом ослабляются (даже срываются) при глобальном потеплении, сопровождающемся уменьшением в целом амплитуды годового хода приповерхностной температуры. Подобная тенденция достаточно четко проявляется при сравнении температурных спектров для многолетних подпериодов в течение последнего столетия с различными средними температурными режимами и относительно слабыми трендами (с большой квазистационарностью режимов). КДК температуры тропосферы (стратосферы) в целом ослабляются (усиливаются) при приповерхностном и тропосферном потеплении. Такое поведение связано с общей тенденцией уменьшения (увеличения) амплитуды годового хода температуры тропосферы (стратосферы).

Имеются многочисленные сведения о связи КДК с меридиональной циркуляцией атмосферы и конвективными процессами в тропиках. Показано (*Huesmann, Hitchman*, 2001), что КДК скорости зонального ветра в тропической стратосфере модулируют ветер в верхней тропической тропосфере. КДК скорости зонального ветра могут быть связаны с другими низкочастотными процессами системы океан – атмосфера, в частности, с ЮКЭН и явлением Эль-Ниньо, основное влияние которого проявляется в воздействии на амплитуды планетарных волн в тропосфере (*Gray et al.*, 1992; *Baldwin, Dunkerton*, 1998). Связь КДК скорости зонального ветра с активностью тропических ураганов в Атлантике впервые показана в (*Gray*, 1984а, б) – при западной фазе КДК активность тропических ураганов сильнее, чем при восточной фазе. До сих пор механизмы связи КДК с активностью тропических ураганов не известны. Проведены попытки объяснить ее влиянием КДК на изменение Атлантического океана (*Shapiro*, 1989; *Hess, Elsner*, 1994; *Landsea et al.*, 1998), поскольку существуют КДК вертикального сдвига ветра (*Gray*, 1984а, б). Тропосферный сдвиг ветра влияет на формирование и развитие тропических циклонов, однако, считается, что КДК ограничены нижней стратосферой и слабо проявляются в верхней тропосфере. Проводились также попытки объяснить такую связь посредством влияния КДК на статическую устойчивость (*Knaff*, 1993) или на вертикальное распространение восточных волн (*Shapiro*, 1989). Однозначный вывод о существовании связи КДК с активностью тропических ураганов над акваториями Мирового океана сделать трудно и некоторыми исследованиями такая связь оспаривается. В работе (*Camargo, Sobel*, 2010) проведено исследование наличия связи между КДК и активностью тропических ураганов над Атлантикой. Анализ данных за период времени до 1983 г., которые изучались также в (*Gray*, 1984а, б), показал наличие такой связи, однако она не была обнаружена при анализе данных за последующий период времени. Таким образом, несмотря на то, что КДК среднего зонального стратосферного ветра – тропическое явление и ряд работ показал наличие возможных связей с циркуляцией стратосферы и тропосферы, с конвекцией и активностью тропических циклонов, тем не менее, однозначного заключения о существовании устойчивых связей КДК и тропического циклогенеза пока нет и вопрос требует дальнейшего исследования.

Наблюдения показывают связь КДК с распределением различных примесей и их переносом к полюсам, с углеродным циклом в атмосфере, с межгодовыми вариациями содержа-

ния озона. Предварительное изучение межгодовой изменчивости радиотеплового поля Земли над Мировым океаном по данным микроволнового спутникового мониторинга (*Федулов, Астафьева, 2008; Астафьева и др., 2008; Хайруллина, Астафьева, 2010, 2011;*) показало наличие КДК (а также 4–5-летних колебаний) в тропосфере над Атлантическим и Тихим океанами. Таким образом, ряд исследований свидетельствует о наличии КДК температуры воздуха в стрatosфере и тропосфере во внутропических и тропических широтах, а также содержания озона, давления воздуха и распределения радиояркостной температуры.

Накоплены многочисленные свидетельства о КДК характеристик атмосферы Земли. Число работ, посвященных различным аспектам КДК, – изучение структуры, механизма формирования, связи с атмосферной циркуляцией, тропическим циклогенезом и т. д. – не прерывно растет. Однако многие вопросы до конца не исследованы, поэтому изучение КДК остается актуальным. В настоящей работе представлены результаты изучения структуры межгодовых колебаний, в особенности КДК, в тропосфере на основе анализа среднемесячных данных микроволнового спутникового мониторинга Земли – глобальных радиотепловых полей. Проведен анализ серий полей радиояркостной температуры T_r из электронной коллекции глобальных радиотепловых полей ИКИ РАН GLOBAL-Field (<http://www.iki.rssi.ru/asp/>). Поля T_r электронной коллекции 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 два полных поля в сутки, с плотностью покрытия $0,5 \times 0,5$ градусов по поверхности Земли за период 1995–2007 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. Водяной пар заморожен в движения воздуха, он переносится и контролируется тропосферными движениями. Области повышенного влаго- и водосодержания на суточных радиотепловых полях являются отпечатками пространственно-временной динамики тропосферы. Поэтому, изучая КДК радиотеплового поля, мы фактически изучаем КДК тропосферы. Структура радиотепловых полей над Атлантическим океаном исследовалась с помощью различных способов сглаживания данных и регрессионного анализа, что позволило изучить широтную структуру межгодовых колебаний, КДК в частности, в тропосфере и основные тенденции (тренды) радиотеплового поля.

Межгодовые колебания радиояркостной температуры

Для изучения структуры колебаний радиояркостной температуры T_r (широта, долгота, время) применен метод скользящего среднего (один из эффективных инструментов сглаживания временных рядов) и вычислены коэффициенты линейной регрессии. Метод скользящего среднего заключается в обычной замене значений членов временного ряда на среднее арифметическое по соответствующему окну – периоду сглаживания, который зависит от характера временного ряда и целей исследования.

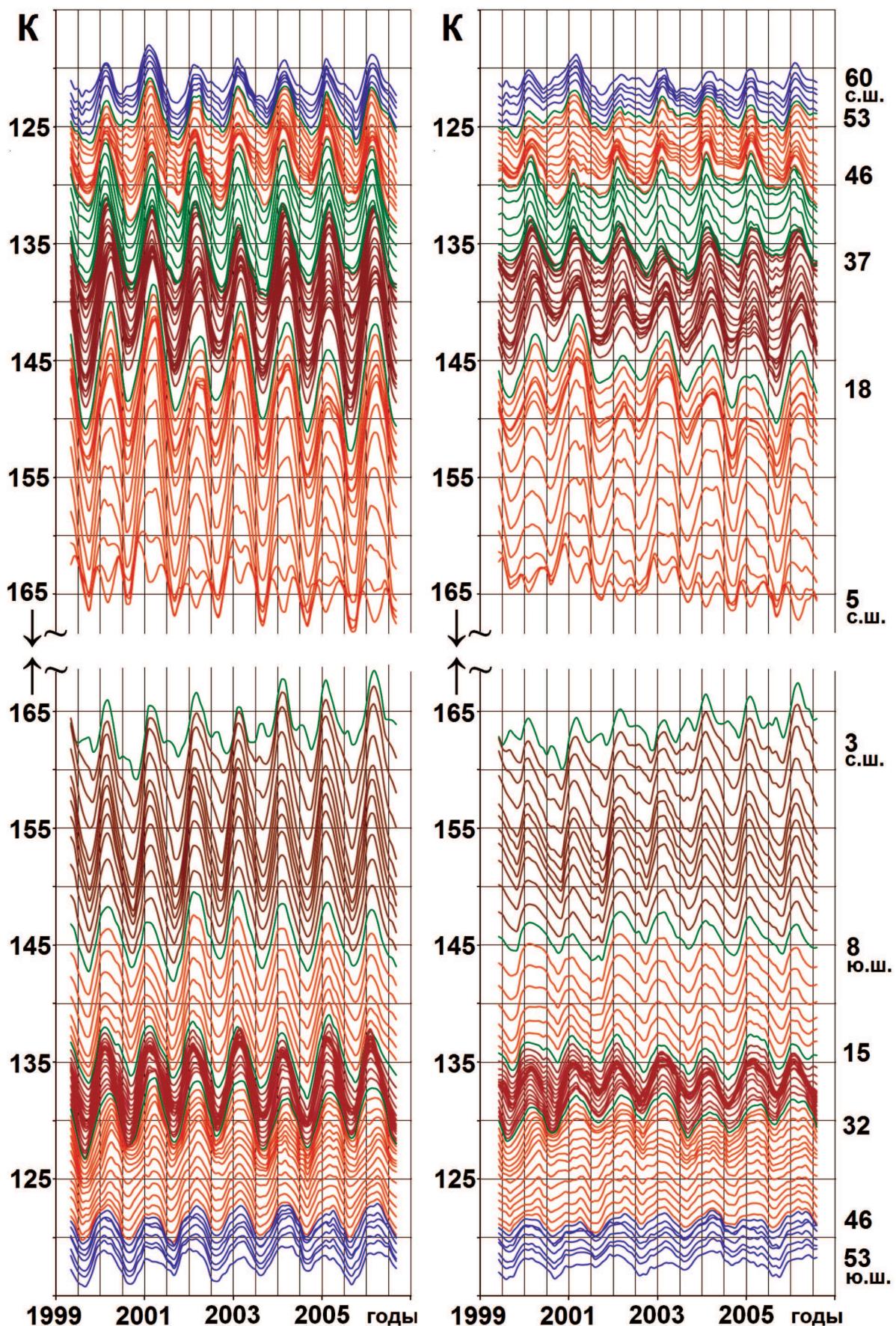


Рис. 1. Временной ход радиояркостной температуры со скользящим 8-месячным (слева) и 10-месячным (справа) осреднением (через каждый градус широты)

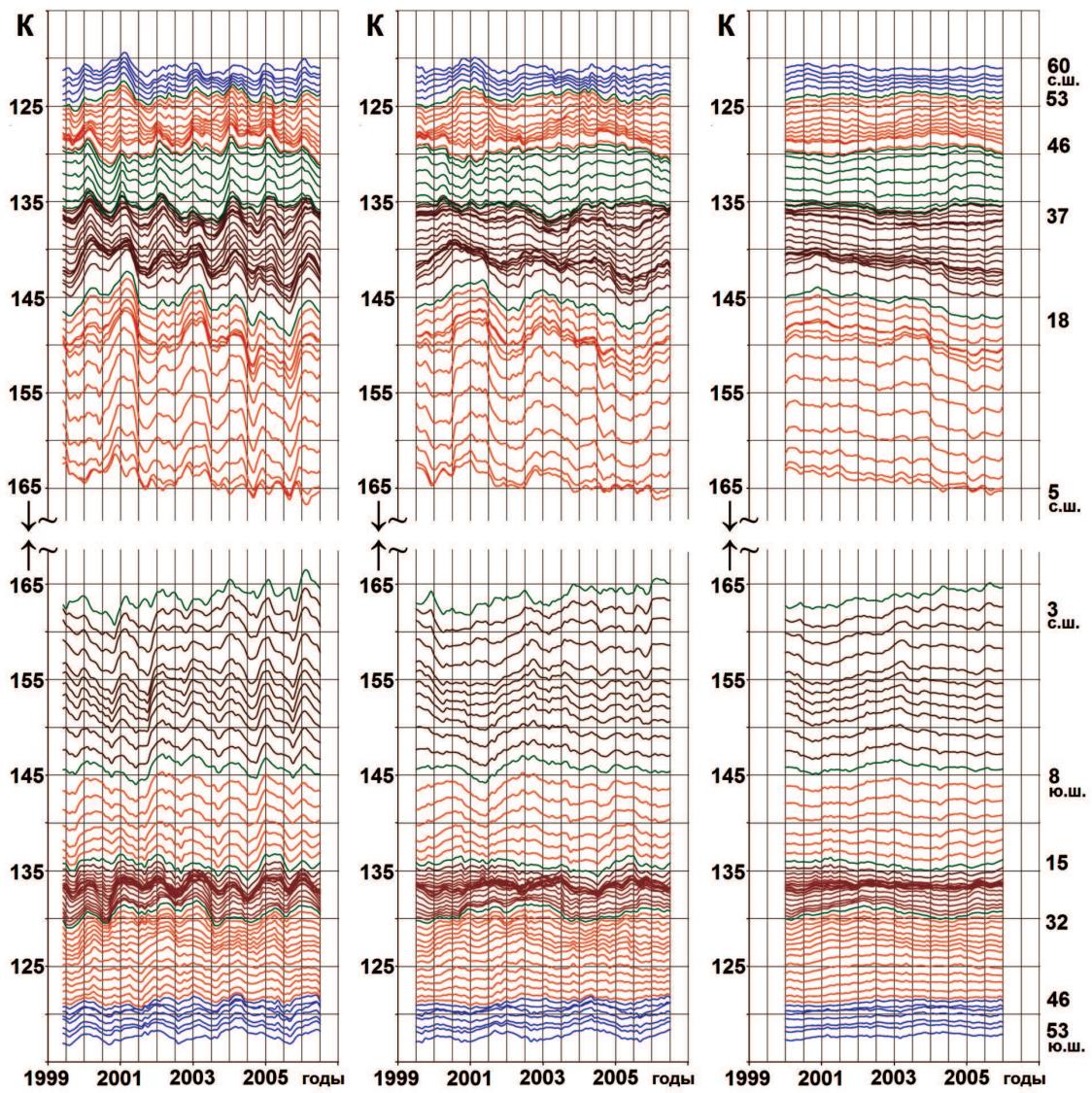


Рис. 2. То же, что на рис. 1 с 11-, 12- и 24-месячным осреднением (слева направо)

При разных периодах сглаживания построены графики изменения $\langle Tr \rangle$ для каждой широты Атлантического океана (через один градус) за период с 1999 по 2006 г. Представлены слаженные кривые $\langle Tr \rangle$, полученные с периодами сглаживания 8 и 10 мес (рис. 1), а также 11, 12 и 24 мес (рис. 2), соответственно. Кривые показаны в плоскости ($\langle Tr \rangle$ в градусах Кельвина, время в годах). Каждая кривая соответствует изменению $\langle Tr \rangle$ на определенной широте (значения широт – справа). Чтобы кривые изменения $\langle Tr \rangle$ в разных полушариях при близких температурах не накладывались друг на друга, они разделены по полушариям и для наглядности Северное и Южное Полушария показаны как бы в зеркальном отражении относительно климатического экватора. В верхней части рисунков представлено изменение $\langle Tr \rangle$ в Северном Полушарии – на широтах 5–60° с.ш.; значение температуры увеличивается сверху вниз, а широта уменьшается. В нижней части рисунков показано изменение $\langle Tr \rangle$ в Южном климатическом полушарии на широтах 4° с.ш. – 60° ю.ш. – здесь значение температуры сверху вниз уменьшается, а широта растет (поэтому смена знака тренда в полушариях кажущаяся – тренд, в основном, положительный, подробнее о тенденциях изменения $\langle Tr \rangle$ см. ниже).

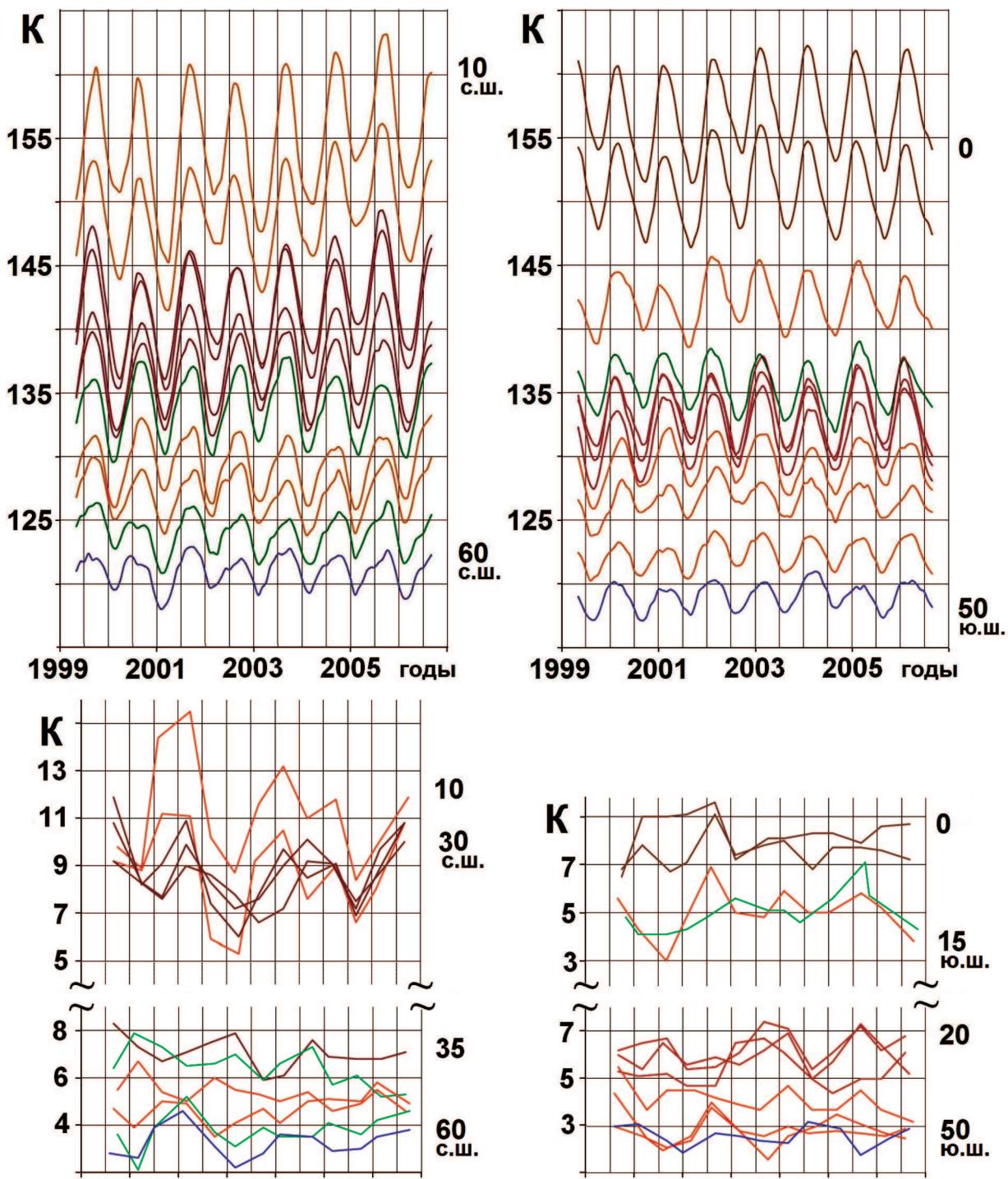


Рис. 3. Изменение $\langle Tr \rangle$ со скользящим 8-месячным осреднением (вверху) и размахи межгодовых колебаний $\langle Tr \rangle$ (внизу) в Северном (слева) и Южном (справа) полушариях

При периодах сглаживания 8 и 10 мес (см. рис. 1) и 11 мес (см. рис. 2) хорошо выражена годовая компонента изменения $\langle Tr \rangle$ (противофазность годового хода в разных полушариях связана с зеркальным отражением относительно климатического экватора, $\sim 5^\circ$ с.ш.). При периодах сглаживания 10 мес (см. рис. 1) и 11 мес (см. рис. 2) наблюдается слабо выраженная квазидвухлетняя и более крупномасштабная модуляция годового хода $\langle Tr \rangle$. При 12-месячном периоде сглаживания (см. в средней части рис. 2) КДК хорошо видны на всех широтах, кроме диапазонов 4° с.ш. – 7° ю.ш. и 44 – 53° с.ш. Это может быть связано с тем,

что КДК отсутствуют на восходящих ветвях крупномасштабной меридиональной циркуляции или их гасят более долговременные атмосферные колебания. При 12-месячном осреднении КДК видны на фоне положительного тренда, а при 24-месячном осреднении остается практически один тренд (с долговременной модуляцией).

Радиояркостная температура не равномерно меняется от широты к широте в обоих полушариях, что хорошо прослеживается на кривых с любым сглаживанием. В Северном Полушарии выделяются диапазоны, где температура от широты к широте меняется равномерно ($4\text{--}18^\circ$ с.ш., $26\text{--}31^\circ$ с.ш., $39\text{--}45^\circ$ с.ш. и $46\text{--}60^\circ$ с.ш.) или резким скачком ($18\text{--}19^\circ$ с.ш. и $45\text{--}46^\circ$ с.ш.) или почти постоянна и тогда на рисунках можно видеть сгущение кривых ($19\text{--}26^\circ$ с.ш. и $31\text{--}39^\circ$ с.ш.).

В Южном Полушарии также есть широты, где температура меняется равномерно (4° с.ш. $\text{--}17^\circ$ ю.ш. и $28\text{--}53^\circ$ ю.ш.) и почти постоянна ($17\text{--}28^\circ$ ю.ш.). Отметим, что структура колебаний $\langle Tr \rangle$ изменяется при переходе через широты, где кривые сгущаются – т. е. где температура почти постоянна в достаточно большом диапазоне широты.

Размахи годового хода $\langle Tr \rangle$. В верхней части рис. 3 представлены кривые $\langle Tr \rangle$, полученные с периодом сглаживания 8 мес, в диапазонах $10\text{--}60^\circ$ с.ш. и $0\text{--}50^\circ$ ю.ш. через каждые пять градусов широты.

В нижней части рис. 3 представлены графики размахов межгодовых колебаний $\langle Tr \rangle$: на каждой широте вычислена разница между ближайшими экстремумами $\langle Tr \rangle$ разных знаков. Размахи колебаний уменьшаются от низких широт к высоким; квазидвухлетняя модуляция амплитуды годового хода $\langle Tr \rangle$ наиболее выражена в низких широтах Северного Полушария. Самые большие размахи колебаний и в низких ($10\text{--}15^\circ$ с.ш.) и в высоких ($55\text{--}60^\circ$ с.ш.) широтах наблюдаются в 2000–2001 гг. В Южном Полушарии амплитуда межгодовых колебаний $\langle Tr \rangle$ также меняется и по времени на каждой широте и по широтам, но не так сильно, как в Северном Полушарии.

Тенденции (тренды) $\langle Tr \rangle$. Для изучения тенденций изменения $\langle Tr \rangle$ на разных широтах определены коэффициенты линейной регрессии за исследуемый период времени – на каждой широте проведена линейная аппроксимация $\langle Tr \rangle$ с периодом сглаживания 24 мес. На рис. 4 представлены коэффициенты линейной регрессии в плоскости (широта, коэффициент линейной регрессии) и уровень их достоверности (статистический показатель, оценивающий результат вычислений).

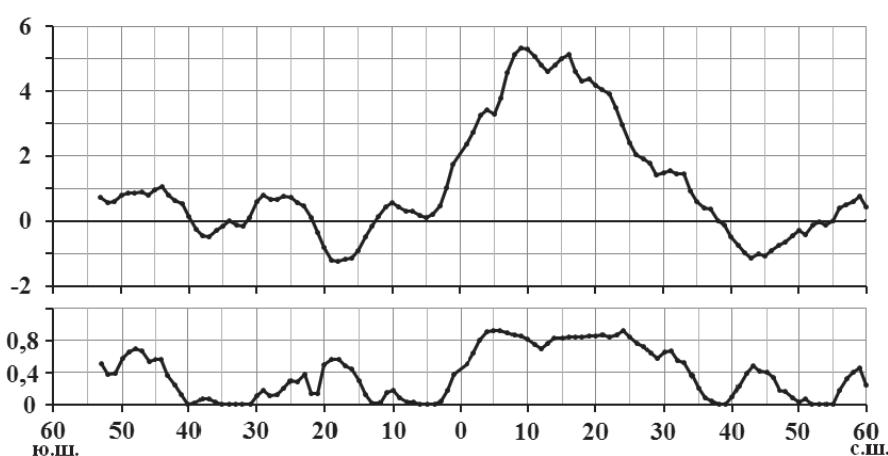


Рис. 4. Коэффициенты линейной регрессии (вверху), уровень их достоверности (внизу)

На широтах 5° ю.ш.– 37° с.ш. прослеживается заметный положительный тренд радиоакустической температуры с максимумом коэффициентов линейной регрессии и с большим уровнем достоверности вблизи 8 – 16° с.ш. (или даже 5 – 25° с.ш.) – т. е. в наиболее энергоактивной зоне северной Атлантики. Диапазоны небольшого положительного (отрицательного) тренда наблюдаются в 22 – 31° ю.ш. (38 – 54° с.ш., 13 – 21° ю.ш.); в диапазонах 5 – 12 и 30 – 40° ю.ш. тренд практически отсутствует. Самый высокий уровень достоверности – в диапазоне наибольшего положительного тренда и достаточно высокий – в диапазонах отрицательного тренда 38 – 54° с.ш. и 13 – 21° ю.ш.

Таким образом, на основе анализа данных микроволнового спутникового мониторинга – серий глобальных радиотепловых полей из электронной коллекции ИКИ РАН GLOBAL-Field (<http://www.iki.rssi.ru/asp/>) – показано наличие квазидвухлетних колебаний в тропосфере Земли (над Атлантикой). Разными методами исследования изучена структура КДК и выявлены ее различия на разных широтах, изучены тенденции радиотеплового поля. Несмотря на многочисленные сведения о связи КДК с меридиональной циркуляцией атмосферы и конвективными процессами в тропиках и на исследования, показавшие связь между КДК и активностью тропического циклогенеза, механизмы связи КДК с активностью тропических ураганов до сих пор не известны, а многими исследователями само существование такой связи оспаривается на том основании, что непонятен ее механизм, поскольку КДК ограничены нижней стратосферой и слабо проявляются лишь в верхней тропосфере. Наши исследования показывают, что КДК проявляются в очень важной для тропического циклогенеза характеристике – в интегральном влагозапасе тропосферы, что свидетельствует скорее о наличии связи между КДК и тропическим циклогенезом, чем о ее отсутствии.

Литература

1. Астафьев Н.М., Раев М.Д., Комарова Н.Ю. (2008) Региональная неоднородность климатических изменений // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса, 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 410–418.
2. Астафьев Н.М., Раев М.Д., Шарков Е.А. (2006) Глобальное радиотепловое поле системы океан – атмосфера по данным микроволновых космических комплексов // Исслед. Земли из космоса, 2006. № 3. С. 64–69.
3. Мохов И.И., Безверхний В.А., Елисеев А.В. (1997) Квазидвухлетняя цикличность температурного режима атмосферы и тенденции ее изменения // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1997. Т. 33. № 5. С. 579–587.
4. Федулов К.В., Астафьев Н.М. (2008) Циркуляция атмосферы и структура климатических изменений (по данным спутникового мониторинга): Препринт ИКИ РАН. Пр-2149. М.: ИКИ РАН, 2008. 32 с.
5. Хайруллина Г.Р., Астафьев Н.М. (2010) Квазидвухлетние колебания в структуре радиотеплового поля над Атлантическим океаном по данным микроволнового спутникового мониторинга // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 53–61.
6. Хайруллина Г.Р., Астафьев Н.М. (2011) Квазидвухлетние колебания радиотеплового поля тропической зоны Атлантики // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 3.
7. Andrews D.G., Holton J.R., Leovy C.B. (1987) Middle Atmosphere Dynamics. San Diego, CA: Academic Press, 1987. 489 p.
8. Baldwin M.P., Dunkerton T.J. (1998) Quasi-biennial modulations of the Southern Hemisphere stratospheric polar vortex // Geophysical Research Letters. 1998. V. 25. N. 17. P. 3343–3346.
9. Camargo S.J., Sobel A.H. (2010) Revisiting the influence of the Quasi-biennial oscillation on tropical cyclone activity // J. Climate. 2010. V. 23. P. 5810–5825. doi: 10.1175/2010JCLI3575.1.

10. *Gray W.M.* (1984a) Atlantic seasonal hurricane frequency. Pt. I: El-Nino and 30-MB quasi-biennial oscillation influences // Month. Weather Rev. 1984. V. 112. P. 1649–1668.
11. *Gray W.M.* (1984b) Atlantic seasonal hurricane frequency. Pt. 2: Forecasting its variability // Month. Weather Rev. 1984. V. 112. P. 1668–1683.
12. *Gray W.M., Scheaffer J.D., Knaff J.A.* (1992) Influence of the stratospheric QBO on ENSO variability // J. Meteorological Soc. of Japan. 1992. V. 70. P. 975–995.
13. *Hess J.C., Elsner J.B.* (1994) Historical developments leading to current forecast models of Atlantic hurricane activity // Bull. American Meteorological Soc. 1994. V. 75. P. 1611–1621.
14. *Huesmann A.S., Hitchman M.H.* (2001) The stratospheric quasi-biennial oscillation in the NCEP reanalyses: Climatological structures // J. Geophysical Research. 2001. V. 106. P. 11859–11874.
15. *Knaff J.A.* (1993) Evidence of a stratospheric QBO modulation of tropical convection. Colorado State Univ. Technical Rep. Paper 520. 91 p.
16. *Landsea C.W., Bell G.D., Gray W.M., Goldenberg S.B.* (1998) The extremely active 1995 Atlantic hurricane season: Environmental conditions and verification of seasonal forecasts // Month. Weather Rev. 1998. V. 126. P. 1174–1193.
17. *Mokhov I.I., Bezverkhny V.A., Eliseev A.V., Petukhov V.K., Senatorsky A.O.* (1994) Intra-decadal climate oscillation global and regional tendencies of change // Ann. Geophys. 1994. V. 12. Suppl. 2. P. C529.
18. *Mokhov I.I., Bezverkhny V.A., Eliseev A.V., Petukhov V.K.* (1995) Quasi-biennial climate oscillation: Global and regional tendencies of change // IUGG 21 General assembly (Boulder, CO, USA): Abstr. Week B. 1995. P. B259.
19. *Shapiro L.J.* (1989) The relationship of the quasi-biennial oscillation to Atlantic tropical storm activity // Month. Weather Rev. 1989. V. 117. P. 1545–1552.

The Latitude-Time Structure of the Quasi-Biennial Oscillations of a Radio Thermal Field (Troposphere)

G.R. Khairullina, N.M. Astafieva

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

Interannual variability of an atmosphere and, in particular, quasi-biennial oscillation (QBO) are investigated. Most researches are devoted to studying QBO of zonal wind in an equatorial stratosphere. The present study investigates variability of a radio thermal field of the Earth at the frequencies containing the information about a moisture and water integral content distribution in a troposphere. It is shown that QBO being the major process of an equatorial stratosphere are characteristic for a radio thermal field of the Earth in a microwave range, i.e. for the troposphere. The structure of a radio thermal fields over Atlantic ocean is studied by using different smoothing technique and regression analysis. It is allowed to reveal latitudinal structure of interannual variability in a troposphere and the basic tendencies (trends) of a radio thermal field. It is shown that QBO are become apparent in very important characteristic of tropical cyclonegenesis – in a moisture integral content in a troposphere, that is indicated the links between QBO and tropical cyclogenesis (which is contested by some researchers) than its absence.

Keywords: general circulation of atmosphere, quasi-biennial oscillation, microwave satellite monitoring, global radio thermal field, tropical cyclogenesis.