

УДК 551.510

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА И УФ-ОБЛУЧЕННОСТИ С ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ В ТРОПИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ

Н. А. Крамарова, Г. И. Кузнецов

(кафедра физики атмосферы)

E-mail: atm554@phys.msu.su

Приводятся результаты анализа очищенных от сезонного хода и осредненных за месяц аномалий общего содержания озона и УФ эритемной облученности в тропиках по спутниковым данным TOMS 8 за период с ноября 1978 г. по август 2003 г. Для анализа использовался метод эмпирических ортогональных функций, который позволил выделить характерные пространственные и временные структуры в полях аномалий общего содержания озона и УФ-облученности, тесно связанные с элементами общей циркуляции в тропиках.

Обнаружению и исследованию связи озона с элементами общей циркуляции, метеорологическими явлениями и солнечной активностью посвящено огромное количество работ, в том числе и большой цикл исследований, проводимых на кафедре физики атмосферы физического факультета МГУ [1–3]. Особенно важное значение исследования по оценке связи режима глобального озона с естественными, динамическими и солнечно обусловленными факторами приобретают в настоящее время для надежного разделения естественных и антропогенных факторов, управляющих режимом и трендами озона на планете. В этой связи в настоящей работе исследуются особенности изменчивости пространственно-временных полей общего содержания озона (ОСО) и УФ эритемной облученности в тропической области, где в наименьшей мере заметен тренд общего содержания озона, наблюдаемый в последние десятилетия. Кроме того, в тропической области пространственная и временная изменчивость ОСО и УФ-облученности менее выражена, что позволяет выделять эффекты крупномасштабных особенностей общей циркуляции, таких как, например, квазидвухлетняя цикличность (КДЦ), явление Эль-Ниньо и др.

В качестве методики исследования использован метод эмпирических ортогональных функций (ЭОФ), основанный на разложении исходных пространственно-временных полей по ортогональным базисным векторам, которые не задаются заранее, а определяются из самих исходных полей. В результате разложения мы получаем векторы, описывающие пространственное распределение особенностей, присущих изучаемым полям, и соответствующие коэффициенты разложения, характеризующие временную эволюцию в целом по всему исследуемому полю. Кроме того, моды ЭОФ анализа располагаются в порядке уменьшения их вклада в дисперсию исходного поля. Таким образом, первые ЭОФ моды описывают максимальную изменчивость исходного пространственно-временного поля.

В работе использовались осредненные за месяц и очищенные от сезонного цикла поля аномалий общего содержания озона (ОСО) и УФ эритемной облученности по спутниковым наблюдениям TOMS 8 для периода ноябрь 1978 г. – июль 2003 г. Пробелы с июля 1993 г. по июль 1996 г. в спутниковых измерениях TOMS 8 были частично заполнены данными, полученными со спутника METEOR-3, а частично интерполированы.

Предварительные расчеты показали, что для выявления крупномасштабных особенностей в распределении ОСО и УФ-облученности в тропической области вполне достаточно пространственного разрешения  $4^\circ$  по широте и  $40^\circ$  по долготе, поскольку основная изменчивость исследуемых величин в тропиках имеет выраженную широтную зависимость. При таком выборе сетки сохраняются основные, характерные черты в пространственной структуре ЭОФ векторов.

ЭОФ анализ полей аномалий ОСО с удаленным сезонным ходом показал, что первые четыре моды ЭОФ анализа объясняют более 77% изменчивости ОСО (38.1%, 23.4%, 12.4% и 3.5% соответственно). На рис. 1 представлены пространственные структуры первых четырех ЭОФ векторов, а на рис. 2 — соответствующие временные коэффициенты в сравнении с временным ходом гео- и гелиофизических параметров, связь которых с режимом озона наиболее заметна в тропической области [4]. Все величины представлены в нормированном виде. В табл. 1 приведены значения коэффициентов корреляции между временными коэффициентами и рядом гео- и гелиофизических величин.

Первый ЭОФ вектор аномалий ОСО (38.1% изменчивости) отражает связь вариаций озона с одиннадцатилетним солнечным циклом. Пространственная картина первого ЭОФ вектора (рис. 1, а) имеет четкую широтную структуру с незначительными долготными вариациями. Поле симметрично относительно экватора, с увеличением широты величина

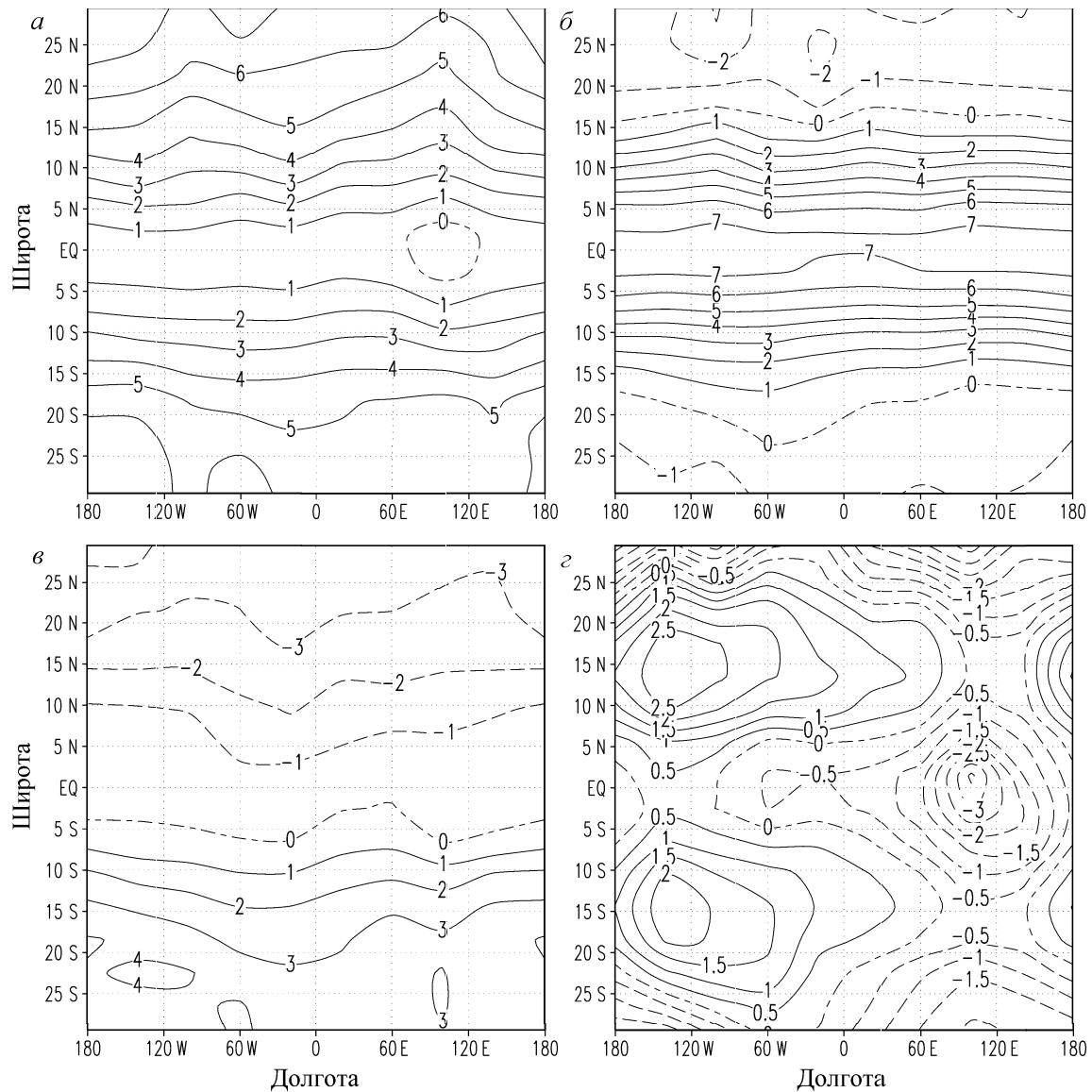


Рис. 1. Пространственная структура первых четырех ЭОФ векторов (а, б, в, г соответственно) аномалий общего содержания озона (ОСО) в тропической области. Широтная область от 30° ю.ш. до 30° с.ш., долготная — от 180° з.д. до 180° в.д. Сплошные изолинии выделяют области положительных аномалий, пунктирные — области отрицательных. Первые четыре вектора описывают 38.1%, 23.4%, 12.4% и 3.5% изменчивости аномалий ОСО соответственно

Таблица 1

**Коэффициенты корреляции временных коэффициентов ЭОФ векторов ОСО с временными рядами гео- и гелиофизических параметров**

Временные коэффициенты	Солнечный поток на 10.7 см	Индекс зонального ветра на уровне 30 мбар	Гармоническая функция с периодом 20.4 месяца	Индекс Южной осцилляции
1 ЭОФ	<b>0.58</b>	-0.29	0.02	0.11
2 ЭОФ	0.19	<b>0.61</b>	0.03	0.11
3 ЭОФ	0.02	-0.29	<b>0.63</b>	0.09
4 ЭОФ	0.02	-0.14	-0.01	<b>0.62</b>

аномалий возрастает. Небольшая область отрицательных аномалий наблюдается в зоне экватора между 70 и 130° в.д. Для этого региона, как отмечалось в работе [5], характерны мощные конвективные про-

цессы. Сравнение временного коэффициента первой моды со значениями солнечного потока на длине волны 10.7 см, характеризующего 11-летний солнечный цикл, показывает хорошее соответствие (рис. 2, а),

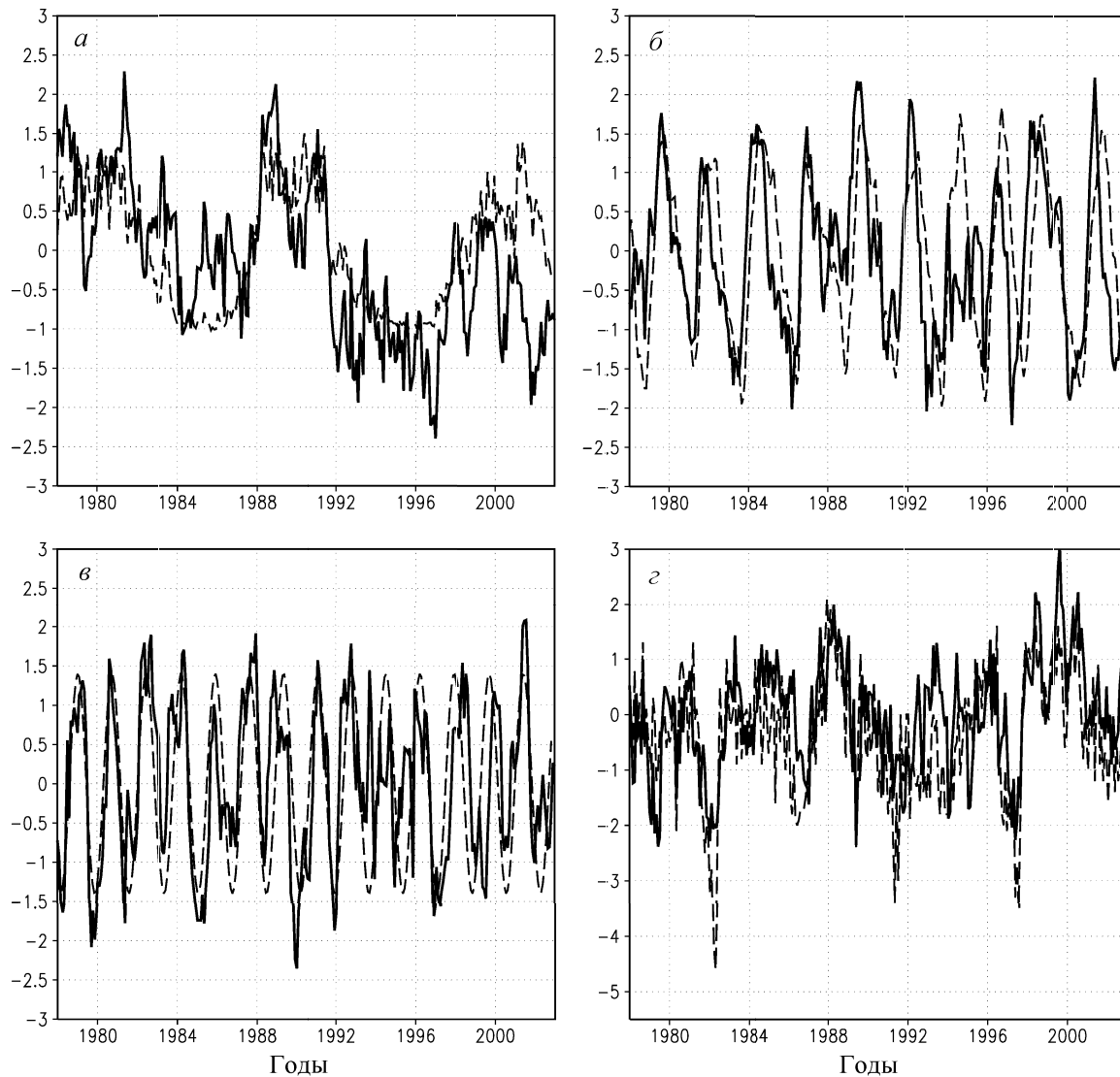


Рис. 2. Временные коэффициенты первых четырех ЭОФ векторов аномалий ОСО (жирные сплошные кривые) в сравнении с гео- и гелиофизическими параметрами (пунктирные кривые): *а* — коэффициент 1-ЭОФ вектора и солнечный поток на 10.7 см, *б* — коэффициент 2-ЭОФ вектора и индекс зонального ветра в Сингапуре на уровне 30 мбар, *в* — коэффициент 3-ЭОФ вектора и гармоническая функция с периодом 20.4 месяца, *г* — коэффициент 4-ЭОФ вектора и индекс Южной осцилляции. Все величины нормированы

коэффициент корреляции равен 0.58. Кроме того, на рис. 2, *а* прослеживается заметный отрицательный тренд за весь 25-летний период наблюдений, который также был отмечен в этой широтной зоне по данным эксперимента SAGE [6].

В пространственном распределении второго вектора (23.4% изменчивости), отражающего, как будет показано ниже, связь озона с КДЦ, выделяется четкая широтная структура. В экваториальной области наблюдаются положительные значения аномалий, а в субтропиках — меньшие по величине отрицательные аномалии. В широтной области между 15 и 20° в обоих полушариях происходит смена знака аномалий. Такая пространственная структура в распределении аномалий ОСО, связанных с КДЦ, хорошо согласуется с результатами, представленными в работе [7]. Временной коэффициент второй моды показал достаточно высокий коэффициент кор-

реляции 0.61 с временным ходом индикатора квазидвухлетнего цикла (КДЦ) — зональным ветром в Сингапуре на высоте 30 мбар. Это позволяет утверждать, что характеризуемая вторым ЭОФ вектором изменчивость ОСО связана с квазидвухлетними колебаниями ветра в стратосфере. Коэффициент корреляции между двумя временными рядами при сдвиге на три месяца возрастает с 0.61 до 0.72. Таким образом, изменения ОСО опережают КДЦ на три месяца, что хорошо видно на рис. 2, *б* и 3, *б*. Этот замечательный результат позволяет говорить об озоне как прогностическом факторе КДЦ.

Для пространственного распределения третьего ЭОФ вектора аномалий ОСО (12.4% изменчивости) характерна широтная асимметрия (рис. 1, *в*). В Северном полушарии наблюдаются отрицательные аномалии, а в районе 0–5° ю.ш. знак аномалии меняется. В целом пространственное распределение

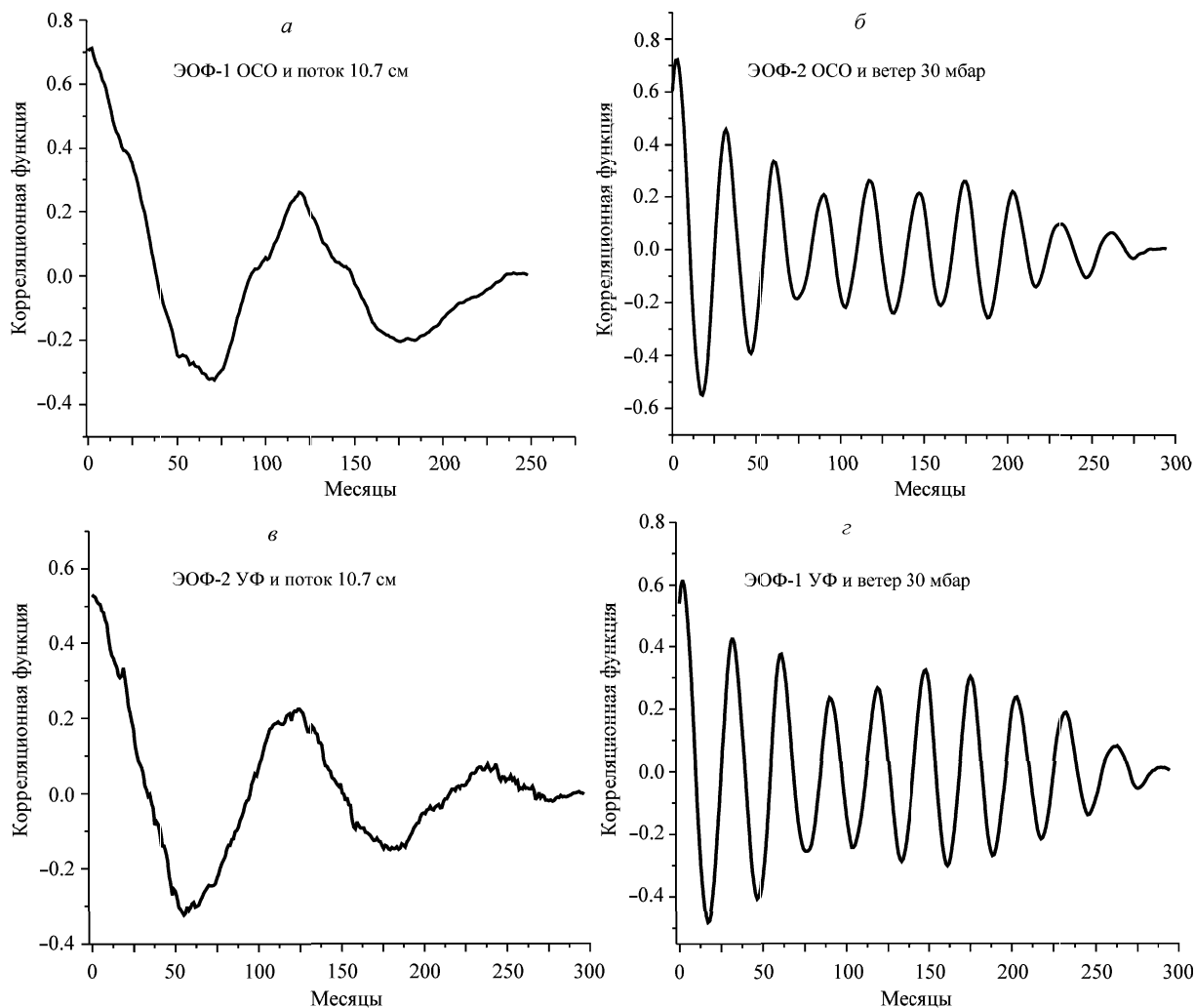


Рис. 3. Нормированные взаимно корреляционные функции для солнечного потока на 10.7 см и индекса зонального ветра в Сингапуре на уровне 30 мбар с двумя первыми временными коэффициентами ЭОФ векторов аномалий ОСО (а, б) и УФ-облученности (в, г)

обладает широтной структурой с небольшими долготными вариациями. Анализ временного коэффициента третьей моды показал близость к колебаниям с периодом около 20 мес. Такой период в изменчивости ОСО уже был отмечен и выделен ранее [8]. Можно сделать вывод, что третья мода описывает изменчивость общего содержания озона, связанную с интерференционным воздействием годового и квазидвухлетнего циклов, образующим период около 20 месяцев.

В пространственном распределении четвертого ЭОФ вектора ОСО (3.5% изменчивости) выделяются заметные волновые структуры с двумя максимумами, симметрично расположенными в областях, близких к зонам внутритропической конвергенции (ВТЗК), на широтах около  $15^\circ$  в обоих полушариях и центрированными на  $120^\circ$  з.д., и одним минимумом, расположенным в районе экватора и центрированным на  $120^\circ$  в.д. (рис. 1, г). Временной коэффициент четвертой моды достаточно хорошо совпадает с временным ходом индекса Южной осцилляции (разность давлений на уровне моря в двух точках:

Таити и Дарвин), коэффициент корреляции между двумя рядами равен 0.62 (рис. 2, г).

Переходя к ЭОФ анализу полей аномалий УФ эритемной облученности в тропиках, прежде всего отметим, что первые четыре моды объясняют лишь 32% изменчивости аномалий УФ-облученности (12%, 9.5%, 6% и 4.3% соответственно) в отличие от ЭОФ анализа полей аномалий ОСО, где первые четыре моды объясняют более 77% изменчивости. Режим УФ-радиации зависит от многих факторов: от величины солнечного зенитного угла, концентрации и вертикального распределения озона, аэрозоля и облачности, от орографических факторов. Поэтому величина УФ-облученности очень изменчива, что и объясняет достаточно низкие значения аномалий, описываемых первыми ЭОФ модами.

На рис. 4 представлены пространственные структуры первых четырех ЭОФ векторов аномалий УФ-облученности в тропиках, на рис. 5 — временные коэффициенты ЭОФ векторов в сравнении с некоторыми гео- и гелиофизическими параметрами. Рассчитанные коэффициенты корреляции между геофи-

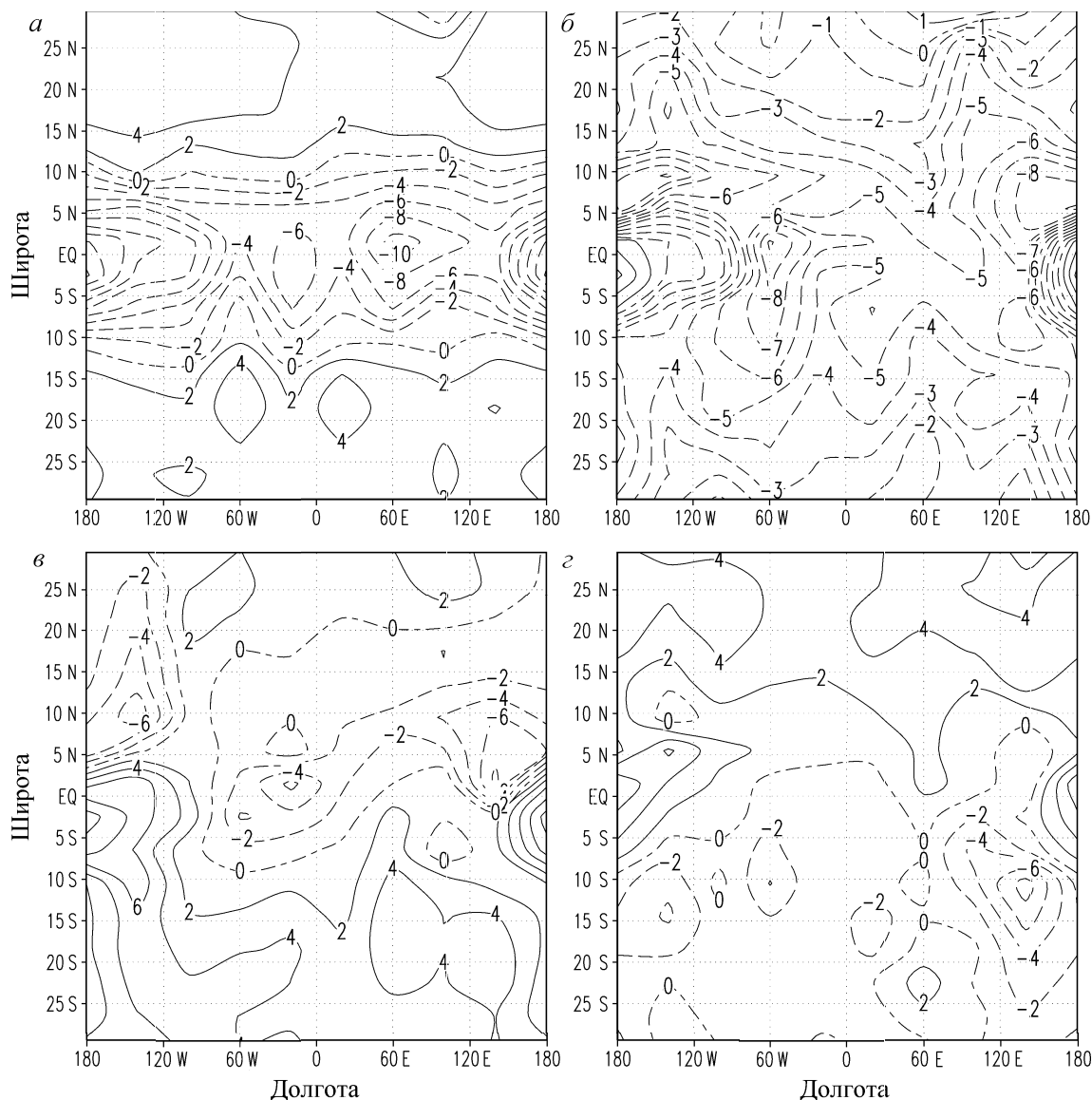


Рис. 4. Пространственная структура (долгота  $\times$  широта) первых четырех ЭОФ векторов (а, б, в, г соответственно) аномалий УФ эритемной облученности в тропической области. Широтная область от  $30^\circ$  ю.ш. до  $30^\circ$  с.ш., долготная — от  $180^\circ$  з.д. до  $180^\circ$  в.д. Сплошные изолинии выделяют области положительных аномалий, пунктирные — отрицательных. Первые четыре вектора описывают 12.1%, 9.5%, 6% и 4.3% изменчивости аномалий УФ-облученности соответственно

Таблица 2

Коэффициенты корреляции временных коэффициентов ЭОФ векторов  
УФ-облученности с временными рядами геофизических параметров

Временные коэффициенты	Солнечный поток на 10.7 см	Индекс зонального ветра на уровне 30 мбар	Гармоническая функция с периодом 20.4 месяца	Индекс Южной осцилляции	Поток длинноволновой радиации
1 ЭОФ	-0.28	<b>0.54</b>	-0.01	-0.26	-0.32
2 ЭОФ	<b>0.53</b>	0.13	0.14	0.35	0.27
3 ЭОФ	-0.15	0.20	-0.32	<b>0.35</b>	0.26
4 ЭОФ	-0.16	-0.01	<b>0.35</b>	0.30	0.29

зическими параметрами и временными коэффициентами ЭОФ векторов аномалий УФ-облученности приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, в отличие от ОСО, для временных коэффициентов УФ-облученности замет-

ные корреляции выделяются лишь для первых двух мод. Первая мода наиболее заметно коррелирует с индикатором КДЦ (0.54), что согласуется с результатами работы [9], а вторая — с одиннадцатилетним солнечным циклом (0.53). Коэффициенты корреля-

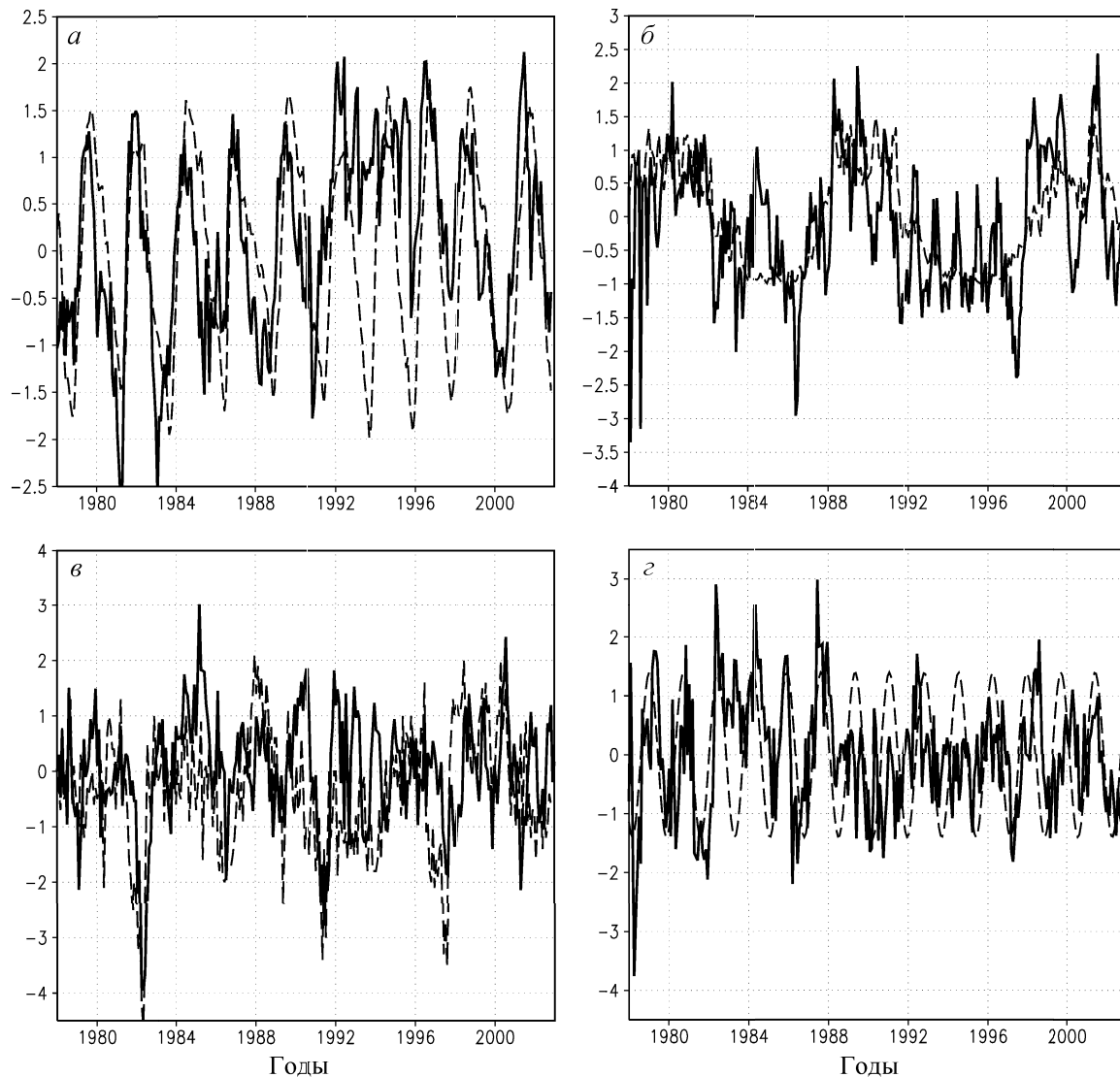


Рис. 5. Временные коэффициенты первых четырех ЭОФ векторов аномалий УФ-облученности (жирные сплошные кривые) в сравнении с гео- и гелиофизическими параметрами (пунктирные кривые): *a* — коэффициент 1-ЭОФ вектора и индекс зонального ветра в Сингапуре на уровне 30 мбар, *b* — коэффициент 2-ЭОФ вектора и солнечный поток на 10.7 см, *v* — коэффициент 3-ЭОФ вектора и индекс Южной осцилляции, *z* — коэффициент 4-ЭОФ и гармоническая функция с периодом 20.4 месяца. Все величины нормированы

ции потока длинноволновой радиации и индекса Южной осцилляции с временными коэффициентами всех четырех ЭОФ мод аномалий УФ-облученности имеют почти одинаковые, небольшие по величине, значения в пределах от 0.25 до 0.35.

Остановимся более подробно на описании и анализе первых двух ЭОФ мод аномалий УФ эритемной облученности. В пространственной структуре первой ЭОФ моды аномалий УФ-облученности (12% изменчивости) наблюдается широтная симметрия относительно экватора (рис. 4, *a*). Выделяются две области аномалий разного знака: область отрицательных аномалий, расположенная вблизи экватора, и область меньших по величине положительных аномалий в субтропиках. Смена знака аномалий происходит в широтной зоне около  $12^\circ$  в обоих полушариях. Временной коэффициент первой моды аномалий УФ-облученности близок к временному ходу

зонального ветра в Сингапуре на высоте 30 мбар (рис. 5, *a*), коэффициент корреляции между двумя рядами равен 0.54. Расчет взаимно корреляционной функции (рис. 3, *z*) между временным коэффициентом первой ЭОФ моды аномалий УФ-облученности и индикатором КДЦ выявил опережение на два месяца изменений УФ-облученности по сравнению с ходом КДЦ. Таким образом, поле УФ-облученности также может служить предиктором КДЦ.

Большой интерес представляет сравнение первой ЭОФ моды аномалий УФ-облученности и второй ЭОФ моды аномалий ОСО, также преимущественно связанной с КДЦ. Видно, что пространственные структуры двух векторов, как и ожидалось, очень похожи, но изменяются в противофазе: в областях, где локализованы положительные аномалии ОСО, наблюдаются области отрицательных аномалий УФ-облученности и наоборот.

В пространственной структуре второй ЭОФ моды (рис. 4, б) аномалий УФ-облученности (9.5% изменчивости) выделяется волновая структура с одним максимумом и двумя минимумами. Область положительных аномалий расположена между  $0-5^\circ$  ю.ш. и центрирована на  $180^\circ$  долготы. Две области отрицательных аномалий расположены: одна — между  $5-10^\circ$  с.ш. в той же долготной зоне, что и область положительных аномалий, а другая — между  $5^\circ$  с.ш. —  $10^\circ$  ю.ш. и вытянута вдоль  $60^\circ$  з.д. Остальное поле отрицательно, при движении к более высоким широтам величина аномалий УФ-облученности уменьшается, а структура поля становится зональной. Временной коэффициент второй моды аномалий показал довольно высокий коэффициент корреляции (0.53) с временным ходом солнечного потока на 10.7 см.

Проведенный в работе ЭОФ анализ полей аномалий ОСО и УФ-облученности позволил выделить вариации, связанные с квазипериодическими динамическими и солнечно обусловленными процессами, проявляющимися в атмосфере тропической зоны Земли. Полученные пространственные и временные структуры полей аномалий ОСО и УФ-облученности позволяют выделять локальные географические области и временные привязки с отдельными элементами общей циркуляции атмосферы, проявляющимися наиболее ярко. Более того, обнаруженное отражение некоторых процессов в полях аномалий ОСО и УФ-облученности позволит в дальнейшем при более детальном анализе развивать прогностические

схемы оценки динамического режима тропической области.

В заключение следует отметить, что успешное применение ЭОФ анализа для тропической области позволит распространить его для исследования характерных структур в распределении аномалий озона и УФ-радиации и их связи с пространственно-временными особенностями других геофизических полей.

#### Литература

1. Кузнецов Г.И. // Тр. VI Всесоюз. симп. «Атмосферный озон». Л., 1987. С. 209.
2. Хргиан А.Х., Кузнецов Г.И. Взаимодействие в системе литосфера-гидросфера-атмосфера. Гл. 4. М., 1996.
3. Danilin M.Y., Kouznetsov G.I. // *Annales Geophysicae*. 1991. **9**. P. 387.
4. Bojkov R., Fioletov V. // *J. Geophys. Res.* 1995. **100**, N D8. P. 16537.
5. Nishii K., Nakamura H. // *Geophys. Res. Lett.* 2004. **31**. P. L16103 (doi:10.1029/2004 GLO 19532, 2004).
6. Wang H.J., Cunnold L.W., Thomason J.M. et al. // *J. Geophys. Res.* 2002. **107**, N D23. P. 4691.
7. Baldwin M.P., Gray L.J., Dunkerton T.J. et al. // *Rev. of Geophys.* 2001. **39**, N 2. P. 179.
8. Yang H., Tung K. // *J. Geophys. Res.* 1995. **100**, N D5. P. 9091.
9. Herman J.R., Piacentini R.D., Ziemke J. et al. // *J. Geophys. Res.* 2000. **105**, N 23. P. 29189.

Поступила в редакцию  
29.06.05