

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

С.Г. Катаев, А.И. Кусков

ИССЛЕДОВАНИЕ ОЗОННЫХ ПОЛЕЙ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ РОССИИ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ГОСУДАРСТВ. I. СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПОЛЕЙ ОЗОНА И ИХ СТРУКТУРА

Сколь ни мало содержание озона в воздухе атмосферы, особенно в тропосфере, его значение для жизни на Земле чрезвычайно велико. Поглощение радиации озоном вызывает значительное и в то же время неодинаковое на различных широтах и высотах изменение температуры атмосферы и влияет на циркуляцию атмосферы.

В последнее десятилетие интерес к проблеме атмосферного озона существенно возрос в связи с его интенсивным уменьшением, возможной причиной которого являются ряд факторов антропогенного проис-

хождения. Мы полагаем, что разделение временных рядов общего содержания озона на составляющие различного временного масштаба (периодические – сезонные, тренд и аномалии) позволит выделить механизмы их формирования в предположении, что эти механизмы различны по исследуемой территории.

Материалом для исследования послужили результаты измерения ОСО за 16 лет (1973–1988 гг.) на 45 озонметрических станциях, расположенных на территории России и сопредельных государств (рис. 1).

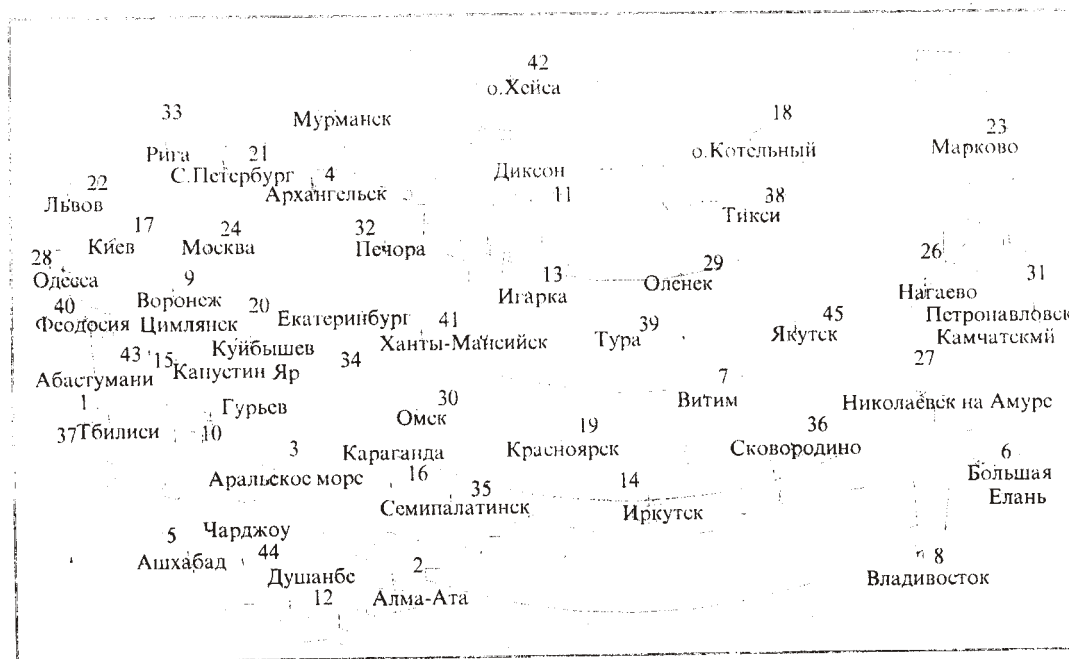


Рис. 1. Расположение станций, используемых для исследования на территории России и сопредельных государств

Если считать, что каждый член временного ряда средних месячных значений ОСО является рассчитанным результатом "работы" нескольких процессов, имеющих разный временной масштаб, то для изучения влияния этих процессов на поведение ОСО необ-

ходимо разложить ряды на составляющие по признаку временного масштаба. При этом предполагается, что масштаб члена ряда, полученный после разложения составляющей, должен соответствовать временному масштабу порождающего ее процесса. В этой связи

нами предлагается модель разложения временных рядов ОСО на составляющие по масштабному признаку. Принцип разложения ряда заключается в предположении, что значения ОСО, порожденные процессами меньшего масштаба, колеблются около величин, сформированных процессами большего масштаба.

$$T_{gm} = T_{ir(gm)} + T_m + \Delta T_{gm}, \quad (1)$$

где индексы gm указывают на год и месяц соответственно, первое слагаемое в правой части $T_{ir(gm)}$ – величина долговременного тренда ОСО, T_m – среднее многолетнее значение ОСО за конкретный месяц, ΔT_{gm} – отклонения средних месячных значений конкретных месяцев от их средних многолетних значений.

Долговременный тренд представляется временным рядом, полученным в результате аппроксимации некоторой гладкой функцией $T_{ir(gm)} = f(gm)$ для $g = 1, 2, \dots, k$, где g – порядковый номер года, k – число лет, m порядковый номер месяца ($m = 1$ – январь и т. д.). Таким образом, каждый член ряда, представляющего долговременный тренд, имеет масштаб осреднения равный продолжительности выбранного периода, величина T_m имеет масштаб осреднения в один год. Масштаб осреднения ΔT_{gm} составляет один месяц.

Разложение ряда на компоненты осуществляется по следующей схеме: используя фактические значения временного ряда ОСО T_{gm} , определяется долговре-

Так, средние месячные значения ОСО совершают колебания около долговременного тренда, аномалии средних месячных значений колеблются около годового хода.

Тогда средние месячные значения в конкретный год (T_{gm}) можно представить как

менный тренд $T_{ir(gm)}$, при этом значения тренда рассчитываются для каждого месяца выбранного периода. Затем из исходного ряда удаляется величина тренда и находится разность $T_m + \Delta T_{gm} = T_{gm} - T_{ir(gm)}$. Годовой ход T_m можно определять, по крайней мере, двумя способами. Первый способ заключается в стандартном расчете среднемесячных многолетних значений. Этот способ не является вполне оптимальным, потому что в расчете среднего многолетнего значения за месяц участвует только 1/12 временного ряда (выборки). При этом способе ошибка расчета среднего многолетнего значения возрастает в $\sqrt{12}$ раз по отношению к методу, в котором использовались все члены ряда.

Другой способ определения годового хода ОСО заключается в представлении величины T_m гармонической функцией

$$T_m = a \sin\left(\frac{\pi}{6}(m-1)\right) + b \cos\left(\frac{\pi}{6}(m-1)\right), \quad (2)$$

где a и b – постоянные для временного ряда коэффициенты, которые рассчитываются как

$$a = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n T_i \sin\left(\frac{\pi}{6}(i-1)\right), \quad b = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n T_i \cos\left(\frac{\pi}{6}(i-1)\right), \quad (3)$$

где i – порядковый номер члена ряда, который связан с номером года g и с номером месяца m как $i = 12(g-1) + m$.

Такое представление годового хода является физически обоснованным. Несовпадение годового хода, рассчитанного по первому и второму методам объясняется выборочными ошибками, которые при применении первого метода в $\sqrt{12}$ больше. Из выражения (3) видно, что для вычисления коэффициентов a и b привлекаются все члены временного ряда, что уменьшает ошибку расчета годового хода. Величина

$A = \sqrt{a^2 + b^2}$ характеризует амплитуду годового хода, а удвоенное значение амплитуды – размах.

При таком способе разложения составляющие исходного временного ряда не коррелированы относительно друг друга. Средние значения составляющих, кроме долговременного тренда, равны нулю. Дисперсия исходного ряда $D(T_{gm})$ (общая дисперсия) равна сумме дисперсий составляющих.

$$D(T_{gm}) = D(T_{ir(gm)}) + D(T_m) + D(\Delta T_{gm}), \quad (4)$$

где $D(T_{ir(gm)})$ – дисперсия тренда, $D(T_m)$ – дисперсия годового хода, $D(\Delta T_{gm})$ – дисперсия аномалий

месячных значений ОСО.

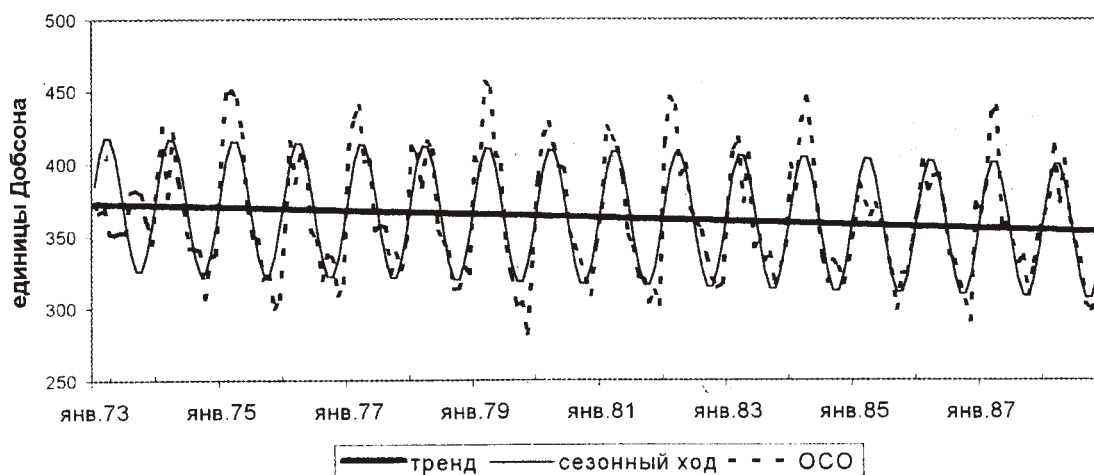


Рис. 2. Временной ход составляющих разложения временного ряда среднего месячного значения суммарного озона над Омском

На рис. 2 приведен временной ход составляющих разложения временного ряда среднего месячного значения суммарного озона. Даже из визуального анализа временного хода видно, что наиболее изменчивой составляющей является годовой ход озона, следующей по величине изменчивости идет аномалия, наименее изменчивым является долговременный тренд. В табл. 1 приведены результаты разложения рядов средних месячных значений ОСО на исследуемых станциях.

Для получения общего представления о характере поля ОСО была построена карта распределения ОСО над территорией России и сопредельных государств (рис. 3). Анализ рисунка позволил установить, что распределение озона над большей частью исследуемой территории имеет почти меридиональный характер. Ярко выражен максимум суммарного озона над Восточной Сибирью и Дальним Востоком. Над этими районами значения ОСО превышают 380 ед. По мере продвижения на юго-запад наблюдается уменьшение средних значений озона, причем сначала медленное, а затем более быстрое (изолинии сгущаются). Так, над Западной Сибирью эти средние количества ОСО приближаются к 370 ед., на Урале — к 360 ед. Почти над всей Европейской территорией России (ЕТР) отмечается малоградиентное размытое поле, средние значения изменяются здесь в диапазоне 10 ед. от 360 до 350 ед. Минимум ОСО приходится на районы Средней Азии и Казахстана. Так, в Таджикистане, Туркменистане, Узбекистане эти значения ниже 340 ед. При этом изолинии принимают широтный характер. Такой характер среднего поля ОСО представляется не совсем ожидаемым, поскольку количество ОСО зависит

от интенсивности фотохимических реакций и можно было бы ожидать широтное расположение изолиний.

В последнее время большой интерес как исследователей, так и общественности прикован к проблеме уменьшения толщины озонового слоя. В этой связи представляло интерес выявить интенсивность этих изменений, а также их локализацию. На рис. 4 представлено распределение по исследуемой территории относительного тренда, выраженного в ед./год.

Из анализа как табл. 1, так и рис. 4 следует, что уменьшение количества ОСО за исследуемый период над большей частью территории протекало довольно интенсивно, хотя диапазон изменения интенсивности разрежения озонового слоя оказался широким, даже на одной из 45 станций отмечался небольшой рост (Караганда — 0,13 ед./год). Максимальное уменьшение ОСО наблюдалось в Нагаево (2,55 ед./год). В целом зоны наибольшего падения расположены в западных и восточных областях исследуемой территории. Над значительной частью территории Сибири выявлено умеренное уменьшение ОСО около 1 ед./год. К настоящему времени большинство исследователей склонны видеть причины разрушения озонового слоя в результате антропогенного воздействия. Не отрицая полностью влияния хозяйственной деятельности на озоновый слой, все-таки необходимо отметить, что характер поля относительного тренда не объясняет целиком этого влияния. Регион Урала с развитой промышленностью должен был бы оказывать существенное воздействие на ОСО, приводящее к его интенсивному уменьшению в районе Западной Сибири. Однако этого не наблюдается.

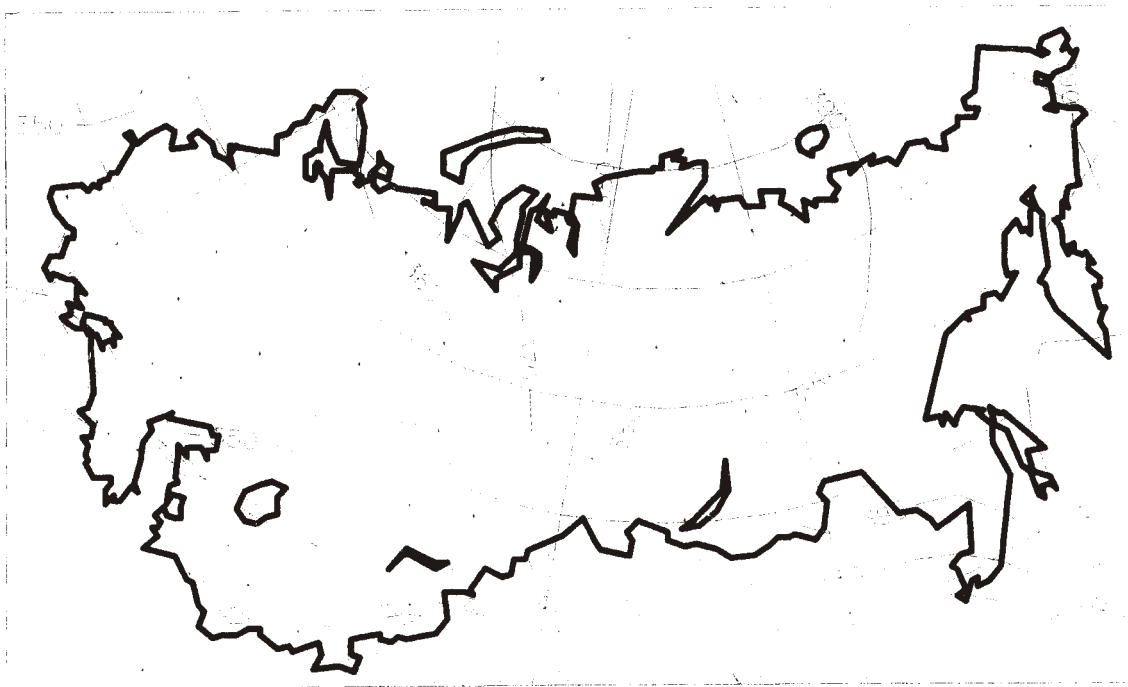


Рис. 3. Распределение средних значений общего содержания озона над территорией России и сопредельными государствами

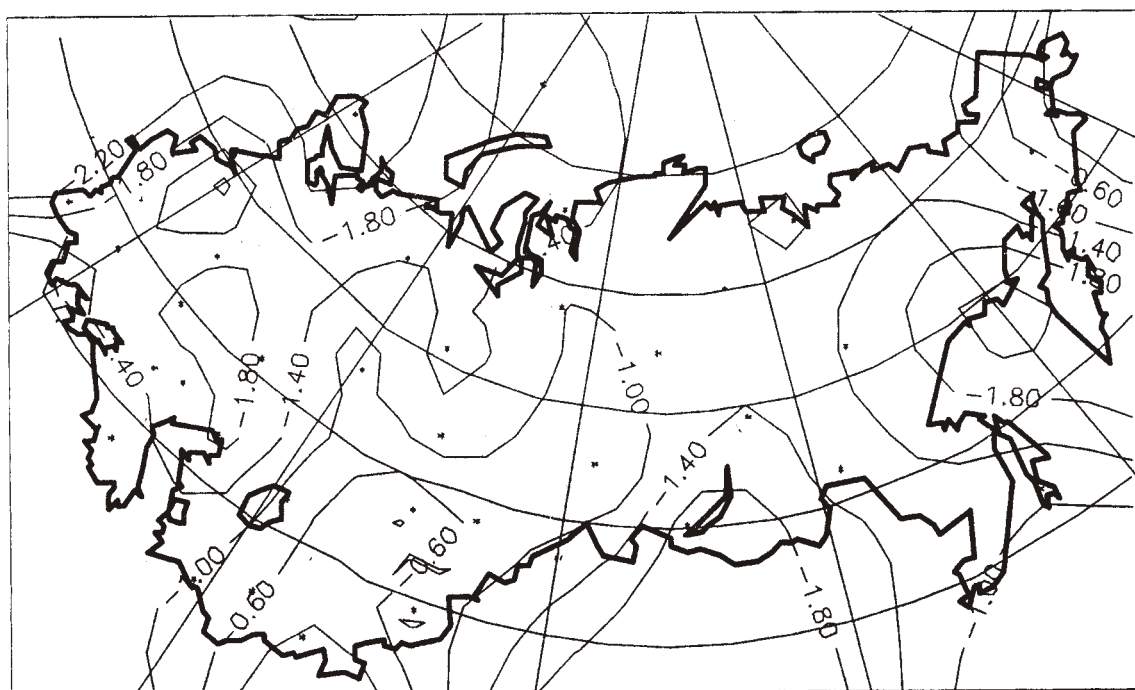


Рис. 4. Распределение относительного тренда (с.Д./год) над территорией России и сопредельными государствами

Таблица 1

Характеристика разложения временных рядов ОСО на составляющие

Номер	Станция	среднее	дисперсия	относ. тренд Дб/год	амплит. годового хода	доля дисперсии		
						годовой ход	Аномалия	тренд
1	Абастумани	328,53	1322,50	- 0,74	45,75	79,13	20,01	0,87
2	Алма-Ата	343,46	1127,78	- 0,91	38,71	66,44	32,00	1,58
3	Аральское море	343,34	1199,84	- 0,77	43,38	78,43	20,53	1,05
4	Архангельск	358,12	2865,50	- 2,44	65,96	75,93	19,63	4,45
5	Ашхабад	318,56	801,52	- 1,04	33,41	69,63	27,52	2,86
6	Большая Елань	398,32	3222,62	- 1,00	75,56	88,58	10,76	0,67
7	Витим	385,40	2869,13	- 1,44	71,68	89,54	8,93	1,54
8	Владивосток	372,53	2940,75	- 1,04	70,52	84,55	14,68	0,78
9	Воронеж	357,55	1650,73	- 1,94	50,58	77,49	17,65	4,88
10	Гурьев	351,37	1208,13	- 1,99	41,59	71,58	21,41	7,02
11	о. Диксон	378,25	4182,34	- 1,52	82,90	82,17	16,66	1,18
12	Душанбе	326,48	719,88	- 0,02	29,56	60,68	39,33	0,02
13	Игарка	375,48	3758,97	- 0,98	79,61	84,30	15,17	0,54
14	Иркутск	381,82	2776,98	- 2,14	65,48	77,19	19,28	3,53
15	Капустин Яр	364,63	1410,59	- 1,61	42,74	64,74	31,36	3,93
16	Караганда	351,21	1288,05	0,13	44,95	78,41	21,57	0,02
17	Киев	356,71	1600,18	- 1,33	48,79	74,38	23,29	2,34
18	о. Котельный	388,15	4878,05	- 1,23	94,05	90,66	8,69	0,66
19	Красноярск	379,55	2414,94	- 0,37	62,07	79,78	20,11	0,12
20	Куйбышев	355,37	1339,84	- 1,75	42,54	67,53	27,63	4,85
21	С.-Петербург	357,58	1825,09	- 0,76	53,95	79,74	19,60	0,67
22	Львов	352,60	1688,46	- 2,38	48,76	70,39	22,48	7,14
23	Марково	391,88	3159,86	- 0,43	73,89	86,39	13,49	0,13
24	Москва	356,92	1713,77	- 1,83	51,22	76,54	19,32	4,15
25	Мурманск	359,87	2930,33	- 2,46	65,69	73,64	21,97	4,40
26	Нагаево	399,57	3334,81	- 2,55	71,26	76,14	19,70	4,17
27	Ник.-на-Амуре	394,73	3215,96	- 1,72	75,27	88,09	9,96	1,96
28	Одесса	352,68	1201,89	- 0,97	40,31	67,61	30,73	1,67
29	Оленек	382,72	3456,07	- 1,31	77,68	87,31	11,64	1,06
30	Омск	362,62	1611,52	- 1,22	47,20	69,11	28,94	1,96
31	П.-Камчатский	396,46	3186,88	- 2,02	73,85	85,56	11,71	2,73
32	Печора	360,54	2552,75	- 1,34	62,38	76,22	22,29	1,50
33	Рига	352,88	1968,28	- 1,82	51,91	68,46	27,97	3,58
34	Свердловск	357,97	1517,79	- 0,67	48,47	77,38	22,01	0,63
35	Семипалатинск	354,32	1393,62	- 0,71	46,94	79,04	20,21	0,76
36	Сковородино	400,28	3543,88	- 1,21	79,77	89,77	9,36	0,88
37	Тбилиси	334,73	1028,27	- 1,29	39,06	74,19	22,37	3,46
38	Тикси	385,68	3671,74	- 0,86	81,37	90,15	9,43	0,43
39	Тура	379,60	3409,58	- 1,13	75,25	83,03	16,18	0,80
40	Феодосия	350,48	1162,30	- 1,47	41,53	74,20	21,86	3,96
41	Ханты-Мансийск	357,38	2124,34	- 1,60	57,66	78,24	19,20	2,57
42	о. Хейса	373,77	4835,11	- 1,55	91,48	86,54	12,41	1,05
43	Цимлянск	354,57	1468,21	- 1,45	47,09	75,52	21,43	3,05
44	Чарджоу	327,58	856,70	- 0,62	33,69	66,24	32,81	0,96
45	Якутск	388,03	3337,10	- 1,40	74,76	83,75	15,00	1,26

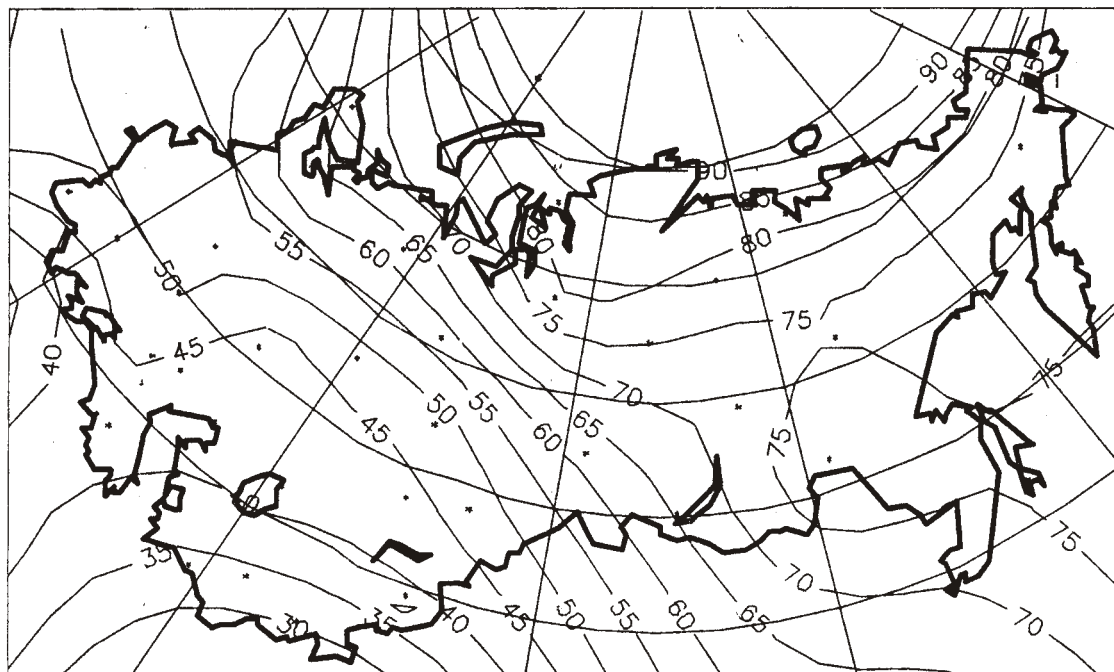


Рис. 5. Распределение амплитуды сезонного хода озона над территорией России и сопредельными государствами

Временные вариации ОСО в значительной степени объясняются годовым ходом, на долю которого приходится от 60% (Душанбе) до 91% (о. Котельный) общей дисперсии. Амплитуды годового хода возрастают с юго-запада на северо-восток с 30 е.Д. (Душанбе) до 94 е.Д. (о. Котельный). Над странами Средней Азии изолинии амплитуды годового хода имеют широтный характер, над западной частью территории, Западной Сибирью и югом Восточной Сибири изолинии направлены с юго-востока на северо-запад. Над северными территориями изолинии располагаются широтно. Особую зону представляет район Дальнего Востока, где отмечается размытое поле со средним значением амплитуды 75 е.Д.

Сравнивая поля распределения среднего значения ОСО и амплитуды годового хода была отмечена их связь, которая иллюстрируется на рис. 6. На этом рисунке представлены уравнение регрессии этой связи и ее характеристика – квадрат коэффициента корреляции. Эта зависимость имеет экспоненциальный характер с высокой степенью связи, что, по-видимому, свидетельствует о единстве механизмов формирования среднего уровня и амплитуды сезонного хода. Радиус корреляции этой связи невысок и составляет 80,6 е.Д., что свидетельствует о высокой скорости изменения амплитуды с изменением среднего уровня ОСО. Из этого следует, что тенденции к уменьшению озонового слоя в весенние месяцы, когда наблюдаются максимальные значения ОСО, будут сильнее.

В осенние же месяцы, когда наблюдается минимум озона, тенденции к уменьшению гораздо слабее. Заметим, что из полученной зависимости автоматически не следует уменьшение амплитуды сезонного хода при

уменьшении среднего значения ОСО в конкретном пункте. Для проверки этого положения была получена зависимость между средним значением ОСО и величиной относительно тренда аномалий (рис. 7).

Относительный тренд аномалий обуславливается трендом амплитуды годового хода. Такая ситуация определяется спецификой разложения ряда на составляющие, когда при выделении годового хода предполагается постоянство амплитуды на всем исследуемом временном периоде. На самом же деле этот тренд относится не к тренду аномалий, а тренду амплитуд годового хода. Таким образом, с уменьшением среднего значения ОСО мы имеем экспоненциальное уменьшение амплитуды годового хода. Равенство показателей экспонент в зависимостях, приведенных на рис. 6, 7 свидетельствует о сохранении зависимости изменения амплитуды от среднего значения ОСО как в пространстве, так и во времени. Это позволяет считать, что при дальнейшем уменьшении толщины озонового слоя следует ожидать резкое уменьшение амплитуды годового хода в конкретном пункте. Это может свидетельствовать о существовании некоторого единого механизма формирования полей озона, как в пространстве, так и во времени.

Из проведенного исследования вытекает, что предложенный метод разложения временных рядов ОСО на независимые составляющие по признаку временного масштаба позволил как получить общее представление о поведении поля озона над обширной территорией России и сопредельных государств, так и найти зависимости, связывающие пространственные и временные характеристики поля ОСО.

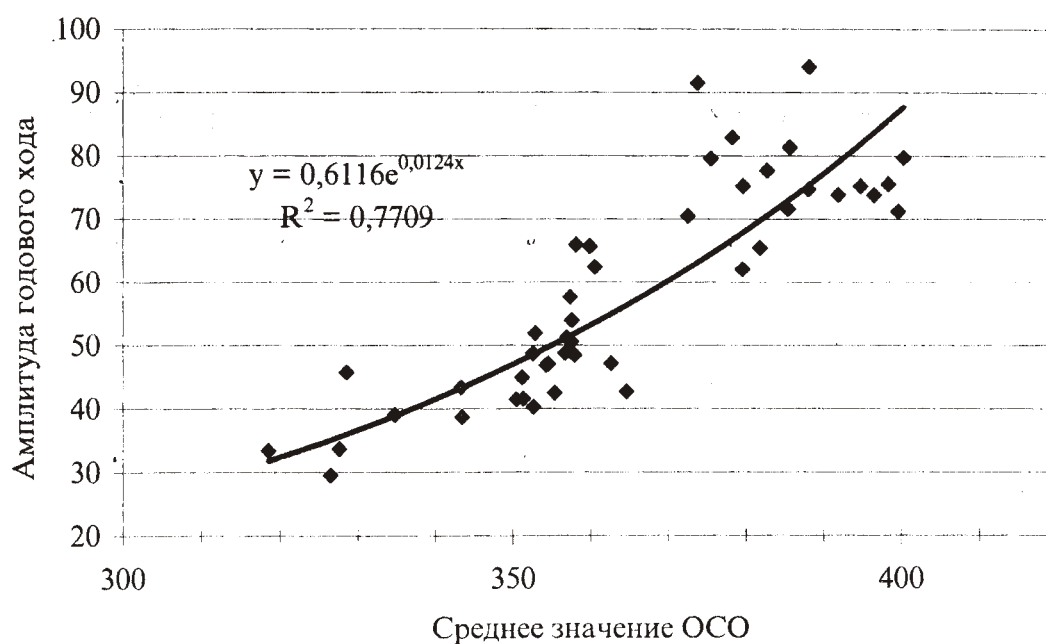


Рис. 6. Связь между амплитудой годового хода и средним значением ОСО

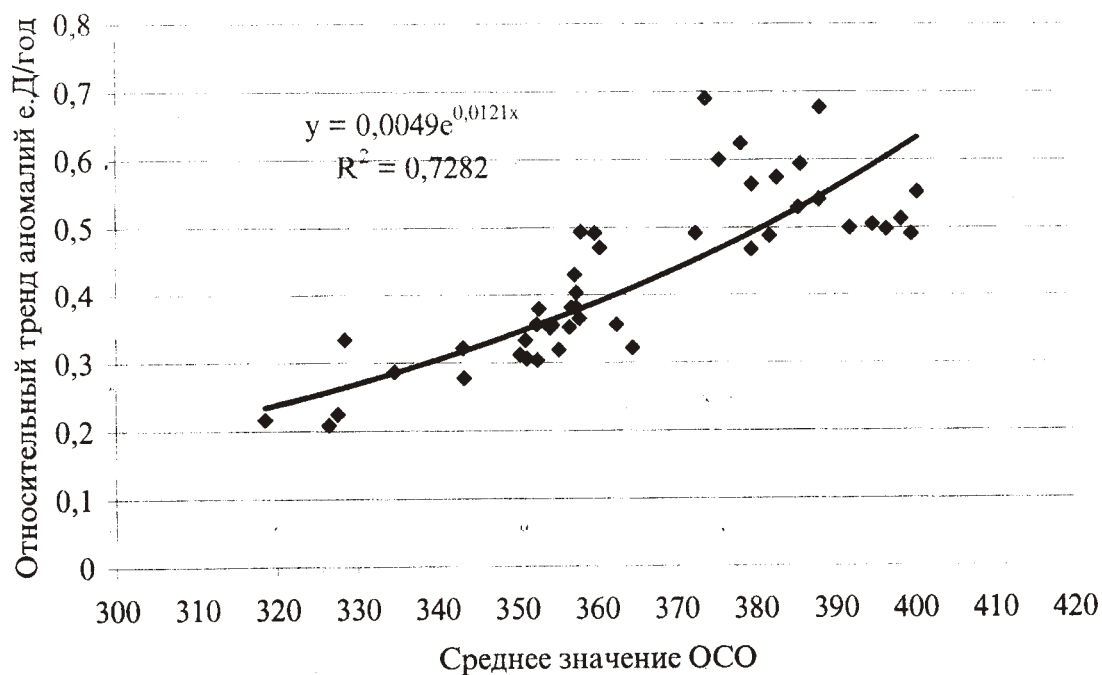


Рис. 7. Связь между трендом аномалий и средним значением ОСО

Литература

1. Александров Э.А., Изразль Ю.А. Озоновый щит Земли и его изменения. Л.: ГМИ. – 1992. – 288 с.
2. Общее содержание озона и спектральная прозрачность атмосферы. Справочные данные за 1973–1988 гг./ под ред. Гущина Г.И. Л., ГМИ. – 1972–1991.