

УДК 551.510.534:551.576

ПОЛЯРНЫЕ СТРАТОСФЕРНЫЕ ОБЛАКА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2008 г. А. В. Поляков, Ю. М. Тимофеев, Я. А. Виролайнен

Научно-исследовательский институт физики Санкт-Петербургского государственного университета
198904 Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 1

E-mail: polyakov@troll.phys.spbu.ru

Поступила в редакцию 03.10.2007 г.

Спектральные коэффициенты аэрозольного ослабления (СКАО), полученные по данным космических измерений прибора SAGE III, использованы для исследования физических и интегральных микрофизических характеристик полярных стратосферных облаков (ПСО). Рассмотрены и проанализированы на основе модельных и натурных измерений различные критерии обнаружения ПСО по измерениям СКАО. Проведено их взаимное сравнение, показано взаимное соответствие и различия результатов, получаемых при использовании разных критериев. Предложен новый критерий выделения ПСО, основанный на оценке близости измеренного вектора спектрального коэффициента ослабления к модельному распределению ансамбля ПСО. На основе различных критериев среди всех наблюдений SAGE III (более 30000) выделены случаи наблюдения ПСО. Все критерии отбора приводят к качественно и количественно сходному пространственно-временному распределению областей локализации ПСО. ПСО, наблюдаемые в области доступной измерениям SAGE III, локализируются в широтной зоне 65–80° в Северном полушарии и 45–60° в Южном полушарии в зимне-весенний период. В Северном полушарии ПСО наблюдаются в области долгот 120 W–100 E с максимумом частоты наблюдения ПСО вблизи Гринвичского меридиана. Область обнаружения ПСО в Южном полушарии по долготе почти такая же, но с некоторым сдвигом максимума частоты обнаружения на запад. Этот максимум наблюдается вблизи 40 W, обычная область обнаружения ПСО – 60-градусная окрестность долготы максимума. Получены оценки физических параметров ПСО: средние высоты нижней и верхней границ ПСО составляют 19.5 и 21.9 км, средняя температура в облаках 191.8 К. Получены оценки интегральных микрофизических параметров ПСО: суммарная поверхность частиц NAT $S_{\text{NAT}} = 0.41 \text{ мкм}^2/\text{см}^3$, суммарный объем частиц NAT $V_{\text{NAT}} = 1.1 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$; и всех аэрозольных и облачных частиц вместе $S = 2.9 \text{ мкм}^2/\text{см}^3$, $V = 2.8 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$. Отмечены высокая частота появления ПСО и высокие значения в ПСО величин S и V как всех частиц, так и частиц NAT в январе–феврале 2005 г., в сравнении со всем остальным периодом измерений SAGE III в течение 2002–2005 гг.

1. ВВЕДЕНИЕ

Полярные стратосферные облака (ПСО) играют существенную роль в химии озона, т.к. на поверхности их частиц протекают гетерогенные реакции, влияющие на газовый состав атмосферы, в частности, на содержание хлорных и азотистых соединений, активно участвующих в разрушении озона [1, 2]. Определенное значение ПСО имеют также в радиационном балансе стратосферы и могут приводить к значительным изменениям температуры в полярных районах в зимний период [3]. В связи с этим исследования химических, микрофизических и оптических характеристик ПСО представляют значительный интерес.

ПСО образуются на высотах 15–30 км при экстремально низких температурах, наблюдающихся в условиях полярных зим в стратосфере обоих полушарий, при совместной конденсации паров воды и азотной кислоты на сульфатных частицах

фонового стратосферного аэрозоля, а также в отдельных случаях при замерзании частиц [4]. Эти облака различаются по химическому составу и микрофизике. Термин ПСО фактически объединяет различные типы стратосферных облаков, что отражается в специальной классификации ПСО по различным типам [5]. ПСО типа II наблюдаются при температурах ниже точки замерзания льда (порядка 188 К) и состоят из водяного льда. ПСО типа I (облака, состоящие из раствора азотной кислоты и воды) наблюдаются при более высоких температурах, при этом ПСО типа Ib состоят из мелких частиц в форме переохлажденного трехкомпонентного раствора ($\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}$), а облака типа Ia – из более крупных кристаллогидратов азотной кислоты (nitric acid trihydrate (NAT) или nitric acid dihydrate (NAD)). Подробное численное моделирование ПСО проводилось в ряде работ (см., например, [6, 7]). На основе такого моделирования были исследованы статистические

характеристики микрофизических и оптических параметров ПСО [8, 9].

Изучение ПСО было начато с первых спутниковых наблюдений зимой 1978–1979 гг. в полярных районах с помощью измерений аппаратуры SAM II [10]. В дальнейшем исследования ПСО осуществлялись различными спутниковыми методами с различной спутниковой аппаратурой (SAGE I и II, POAM II и III, CLAES, ILAS II, MIPAS и т.д.), в наземных лидарных измерениях, различных прямых и косвенных измерениях оптических и микрофизических характеристик ПСО в специальных самолетных и аэростатных экспериментах (см., например, [11]).

Спутниковые измерения спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления (СКАО) (прежде всего, с помощью затменного метода) позволили исследовать частоту (вероятность) появления ПСО, их сезонный ход, расположение (широтный и долготный ход), высоты облаков, связь характеристик ПСО с температурой и динамикой атмосферы (например, [4, 10, 12–14]). Спутниковые измерения СКАО в видимой и ИК областях спектра использовались также для определения химического состава ПСО и ряда их микрофизических характеристик. Так, в работе [15] использовались измерения прибора ILAS II в ИК области спектра (июнь–август 2003 г.) для определения состава ПСО и эффективного радиуса составляющих их частиц. В работе [16] предложена методика определения объемов и площадей частиц по данным измерений различных спутниковых приборов (SAM II, SAGE II, POAM II и т.д.). В работе [5] приведены результаты разделения двух типов облаков – типов Ia и Ib по спутниковым наблюдениям. Спектральные ИК измерения собственного излучения атмосферы прибором MIPAS использовались в работе [17] для изучения эволюции ПСО в зимние периоды.

Данная работа посвящена анализу характеристик ПСО на основе данных измерений прибора SAGE III в период 2002–2005 гг. Ранее результаты измерений этим прибором были использованы для изучения содержания озона и интегральных микрофизических характеристик фонового стратосферного аэрозоля [18, 19, 20].

2. КРИТЕРИИ ВЫДЕЛЕНИЯ ПСО

Большое значение при изучении различных характеристик ПСО имеют критерии их отождествления в данных спутниковых измерений. Первоначально использовался единственный критерий – величина СКАО вблизи длины волны 1 мкм (аппаратура SAM II имела только один канал измерений). Появление ПСО ассоциировалось с превышением величиной СКАО в стратосфере вблизи длины волны 1 мкм значения 0.0008 км^{-1} [10]. Этот критерий позволял обнаруживать любые стратосферные облака. В дальней-

шем, в частности, в связи с появлением многоканальной спектральной аппаратуры, использовались более сложные критерии – по сравнению СКАО с коэффициентом релеевского ослабления [12], вертикальной зависимости СКАО, отношению значений СКАО на различных длинах волн, например, на 525 и 1000 нм [21, 22], сопоставлению СКАО с его средними фоновыми значениями, высоте обрыва измерений за счет большого поглощения, температуре атмосферы и т.д. [13, 23, 24]. В работе [25] был предложен алгоритм выделения ПСО для многоканальной аппаратуры SAGE III, основанный на использовании измерений СКАО на трех длинах волн: 525, 1020 и 1550 нм. Разнообразие химических, микрофизических и оптических характеристик ПСО делает проблему выделения ПСО только по измерениям СКАО достаточно трудной и неоднозначной (см., например, [26]).

Для анализа критериев выделения ПСО по измерениям СКАО мы воспользовались двумя модельными статистическими ансамблями реализаций состояния стратосферы. Первый из них представляет объединенную микрофизическую и оптическую модель фонового стратосферного аэрозоля (ФСА) и описан в работе [27]. Второй построен на основе микрофизической модели ПСО [6, 7], дополненной оптическими характеристиками ПСО, рассчитанными в работах [8, 9]. Последняя модель ПСО была разработана для моделирования образования, роста и испарения частиц вдоль воздушных траекторий в арктической стратосфере. Для арктической зимы 1999–2000 гг. было рассчитано большое количество долгосрочных траекторий, основанных на данных, полученных из Метеослужбы Великобритании (УКМО), и позволяющих построить трехмерную картину эволюции арктического вихря. Моделирование охватывало период 1 ноября 1999 г.–15 апреля 2000 г. Для построения ансамблей ПСО использовались несколько сценариев, различающихся набором предположений о микрофизических параметрах и процессах, контролирующих образование и трансформацию ПСО. Результаты моделирования ПСО тщательно сопоставлялись с данными измерительной кампании SOLVE [7] и более ранних кампаний [28, 29]. Для описания микрофизических свойств и соответствующих им оптических характеристик мы рассмотрели суммарный ансамбль ПСО, включающий в себя реализации стратосферного аэрозоля из четырех моделей (Het0many.sed, Het16many.sed, Met_1_m10.once.sed, Nadhet1many.sed), наилучшим образом согласующихся с данными экспериментальных наблюдений. Общий ансамбль реализаций стратосферного аэрозоля и ПСО состоял из 255949 реализаций. Отметим, что максимум функции распределения по размерам (ФРР) фонового стратосферного аэрозоля аэрозольных частиц (жидких и SAT) приходится на размеры десятых долей микрона, в то время как максимум частиц ПСО (NAT и во-

дяной лед) – на единиц микрон. Именно это отличие в средних размерах частиц приводит к различному спектральному ходу СКАО для фонового стратосферного аэрозоля и ПСО, используемому в ряде указанных выше методик выделения ПСО.

Кроме трех предложенных ранее критериев выделения ПСО (см. табл. 1), мы использовали и новую методику. Поскольку мы располагаем статистическими моделями (выборками, ансамблями) состояний атмосферы, соответствующими фоновому стратосферному аэрозолю (ФСА) [27] и ПСО [8, 9], мы использовали собственный критерий выделения ПСО, опирающийся на более современные подходы и использующий статистику именно облаков исследуемого типа, а не произвольной облачности. Расчеты средних СКАО, спектральных ковариационных матриц, их собственных векторов и чисел для фонового стратосферного аэрозоля и ПСО показали, что средний спектральный ход этих характеристик для ПСО несколько менее выражен, чем для ФСА, что соответствует большому вкладу в СКАО крупных частиц в ПСО по сравнению с ФСА.

Как показали наши оценки, при реальной погрешности измерений СКАО (в данных SAGE III от 3–10% до 100%; подробнее см. п. 3.4) достаточно 2–3 собственных векторов ковариационной матрицы СКАО для оптимальной аппроксимации практически любой реализации. При этом расчеты показали, что первые 3 вектора ковариационных матриц СКАО для ансамблей ПСО и ФСА заметно различаются попарно, что позволило использовать оптимальные разложения по собственному базису для идентификации ПСО. Поэтому предложенная нами методика основана на критерии наилучшего приближения измеренных СКАО собственным ортогональным базисом $\{v_n\}$. Смысл его в том, что если первые n векторов ансамбля ПСО приближают вектор наблюдаемых СКАО лучше, чем n векторов ансамбля ФСА, то наблюдаются ПСО. Поскольку численная модель [6, 7] воспроизводит не только ПСО, а вообще все состояния стратосферного аэрозоля, в качестве ансамбля ПСО при построении этого критерия был использован более узкий ансамбль, в который мы отобрали реализации, относящиеся только к ПСО. Для этого мы воспользовались критерием, характеризующим СКАО на длине волны 1.020 мкм [10], и исключили реализации, в которых СКАО меньше 0.0008 км^{-1} , в результате чего осталось 100514 реализаций. Хотя, вообще говоря, критерий [10] выделяет любые облака, в данном случае исходный ансамбль не содержал облачности, отличной от ПСО, поэтому и полученный подансамбль содержит только ПСО. Оценки показали, что оптимальное число векторов разложения равно 3, и далее мы обозначаем этот критерий V_3 .

В табл. 1 просуммированы протестированные нами критерии выделения ПСО на основе сфор-

Таблица 1. Критерии выделения облаков (формулируется условие наблюдения облаков)

Условное название	Обозначение	Критерии	Ссылка
Ослабление на 1 мкм	1	СКАО на длине волны 1 мкм больше 0.0008 км^{-1}	[10]
Две точки спектра	2	СКАО на длине волны 0.52 мкм менее чем в 2 раза превосходит СКАО на 1 мкм	[22]
Три точки спектра	3	Точки плоскости, координаты которых равны отношению СКАО на парах длин волн, лежат внутри заданного прямоугольника	[25]
Близость к линейному подпространству ПСО	V_3	Вектор спектрального СКАО ближе к n -мерному подпространству ПСО, чем к подпространству ФСА.	Настоящая работа

Таблица 2. Количество (процент) правильного отождествления ПСО и ФСА

Критерий	% правильных определений	
	в аэрозольной выборке	в выборке ПСО
1	87	39
2	94	59
3	96	43
V_3	99.8	63.9

мированного ансамбля модельных состояний стратосферы. Как показал численный анализ на модельных и реальных данных, разные критерии дают разные ансамбли ПСО. В табл. 2 приведены проценты успешного выделения случаев ПСО и фонового стратосферного аэрозоля при использовании модельных данных [7, 27]. Заметим, что процент случаев определения ПСО в “выборке ПСО” далек от 100, поскольку эта выборка включает все стадии развития и деградации ПСО, в том числе неотличимые от фонового аэрозоля состояния в моменты зарождения и разрушения облаков. Из табл. 2 видно, что критерий V_3 позволяет правильно классифицировать наблюдения в наибольшем количестве случаев, что указывает на его преимущество перед другими критериями. Из приведенных в табл. 2 данных также видны сильные взаимные различия результатов идентификации ПСО при использовании разных методик их выделения.

Таблица 3. Число выделенных в реальных измерениях наблюдений ПСО

	1	2	3	V_3
1	149	122	108	118
2	122	222	152	161
3	108	152	152	126
V_3	118	161	126	343

Таблица 4. Периоды года и широтные зоны, в которых выполнялись измерения SAGE III

Северное полушарие		Южное полушарие	
Период	Область широт	Период	Область широт
Март–июнь	77–48	Январь–май	35–58
Июль–сентябрь	48–80	Май–январь	58–36
Октябрь–декабрь	80–65		
Январь–февраль	65–77		

Это же подтверждает и табл. 3, где приведены результаты применения различных методик при анализе реальных данных измерений СКАО с помощью прибора SAGE III. В табл. 3 приведены для примера число ПСО, идентифицированных в измерениях SAGE III за весь период наблюдений (2002–2005 гг.) по разным критериям, и степень перекрытия, т.е. число ПСО, “обнаруженных” одновременно двумя методиками (внедиагональные элементы в таблице). Из приведенных данных следует, что используемые критерии могут заметно влиять на число обнаруженных ПСО и тем самым – на оценки различных климатологических характеристик ПСО. Но интересно отметить, что многие полученные нами для различных критериев результаты исследований (см. следующий раздел) оказались взаимно близки, что позволяет предположить объективный характер использованных критериев. Следует также указать, что для исключения других типов облачности при дальнейшем анализе дополнительно использовались два ограничения: температура на наблюдаемой высоте не должна превышать 196 К и высота наблюдений должна быть ограничена диапазоном 15–30 км.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

3.1. Особенности наблюдений

Прежде, чем перейти к анализу результатов, следует указать на специфику пространственно-временного распределения данных измерений прибора SAGE III, обусловленную использованием затменного метода и параметрами орбиты спутника [20]. В табл. 4 указаны периоды года и

широтные пояса в средних и полярных широтах, для которых проводились рассматриваемые измерения.

Широта измерений со временем изменяется очень медленно, как видно из табл. 4; изменение широты измерений на один градус (111 км) занимает время от 5 до 10 сут и более. Вместе с тем прибор за сутки выполняет 26 измерений с равномерным шагом по долготе (поровну в Северном и Южном полушариях). В результате этого данные измерений неудобны для исследования широтного хода атмосферных параметров и могут представлять лишь ограниченный интерес при изучении их изменчивости, но информативны относительно долготных распределений наблюдаемых параметров.

Отметим важные для анализа полученных результатов исследований ПСО факты. Наблюдения выполнялись на характерных для ПСО широтах в ограниченные периоды времени: севернее 65° N (сентябрь–март) и южнее 50° S (апрель–сентябрь). При этом широта наблюдений в Северном полушарии не превосходит 80° N и в Южном не опускается южнее 58° S.

3.2. Пространственное распределение ПСО

На рис. 1 приведено число случаев наблюдения ПСО в соответствии с различными критериями в долготном интервале шириной 10° в зависимости от долготы.

Из рисунка 1 следует:

1. Все критерии отбора приводят к качественно и количественно сходному расположению в пространстве областей, в которых локализируются ПСО.

2. ПСО, наблюдаемые в области, доступной измерениям SAGE III, сосредоточены в широтной зоне 65–80° в Северном полушарии и 45–60° в Южном полушарии.

3. ПСО в Северном полушарии наблюдаются в диапазоне долгот от 120°W до 100°E с максимумом вблизи меридиана Гринвича. В Южном полушарии долготное распределение имеет сходный вид, но со сдвигом максимума на запад. Здесь ПСО обычно обнаруживаются в 120-градусном долготном секторе с центром 40°W.

3.3. Временное распределение ПСО

Напомним, что обнаруженные нами особенности временного распределения ПСО также могут быть связаны с особенностями орбиты и связи между временем и широтой измерений SAGE III (см. табл. 4). На рис. 2 приведено сезонное распределение встречаемости ПСО в наблюдениях SAGE III (осреднение за 4 года наблюдений). Анализ рис. 2 показывает прежде всего, что все критерии выделения ПСО дают качественно совпадающую картину сезонного распределения числа

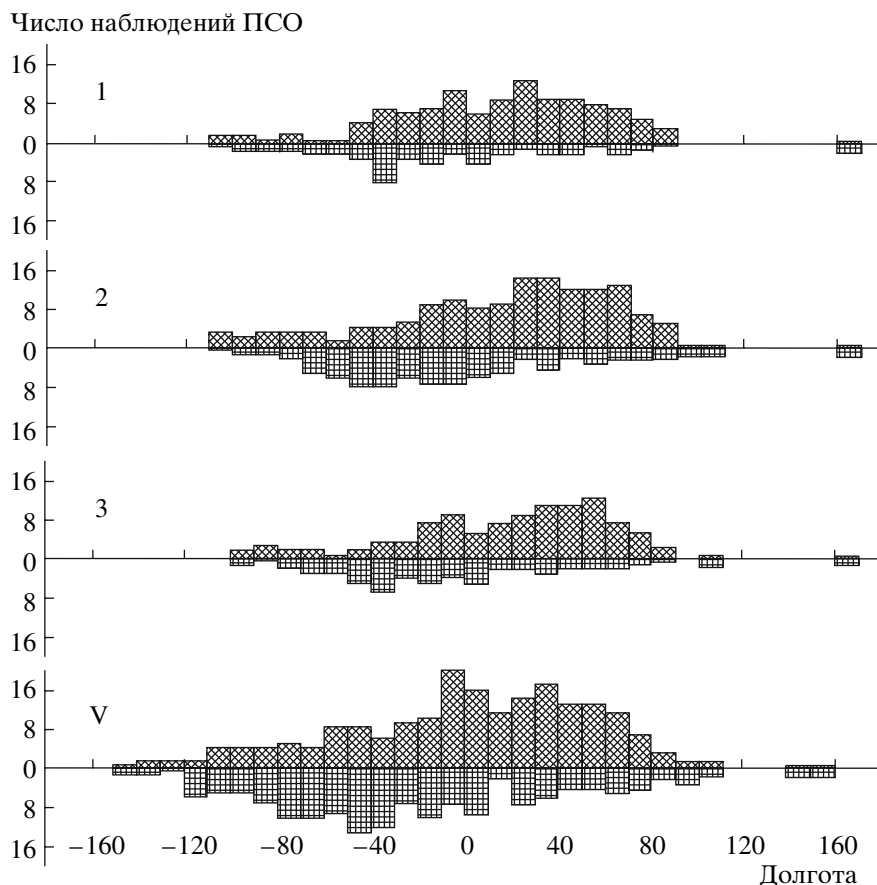


Рис. 1. Долготное распределение числа случаев наблюдений ПСО в 10-градусных интервалах долгот по различным критериям выделения ПСО. Показано количество наблюдений. Верхние части диаграмм выше осей абсцисс (косая штриховка) соответствуют Северному полушарию, нижние (прямая штриховка) – Южному.

случаев наблюдений ПСО. Можно выделить основную закономерность, которая состоит в том, что ПСО наблюдаются зимой как в Северном (ноябрь–февраль), так и в Южном (май–сентябрь) полушариях. Отсутствие наблюдений ПСО в весенний период объясняется уменьшением широты наблюдений в марте в Северном и в октябре в Южном полушариях (см. выше).

3.4. Определение интегральных аэрозольных микрофизических параметров стратосферы

Как показали наши исследования [8, 9], информация, содержащаяся в данных измерений СКАО прибором SAGE III, позволяет оценить суммарные площадь S и объем V аэрозольно-облачных частиц (непосредственное разделение на основе оптических измерений частиц стратосферного аэрозоля и ПСО затруднительно). Кроме того, статистические оценки показали, что можно восстанавливать также площадь S_{NAT} и объем V_{NAT} частиц NAT (кристаллогидрат азотной кислоты)

за счет четкого отличия размеров этих частиц от размеров частиц сернокислотного аэрозоля.

Используя расчетные данные [6–9] и применив к ним те же критерии отбора ПСО (табл. 1), мы построили соответствующие решающие операторы на основе линейной регрессии. При этом решение можно записать в виде выражения (1)

$$x = \bar{x} + K_{xy}(K_{yy} + \Sigma)^{-1}(y - \bar{y}), \quad (1)$$

а оценку погрешности решения обратной задачи получить из соотношения (2)

$$\tilde{D} = K_{xx} - K_{xy}(K_{yy} + \Sigma)^{-1}K_{yx}. \quad (2)$$

Здесь x – искомый вектор (в нашем случае четыре числа: $S, V, S_{\text{NAT}}, V_{\text{NAT}}$), \bar{x} – его среднее значение, y и \bar{y} – измеряемый вектор, (в нашем случае СКАО на определенной высоте) и его среднее значение, Σ – ковариационная матрица погрешностей измерений, K – ковариационные матрицы параметров, указанных в индексах, \tilde{D} – остаточ-

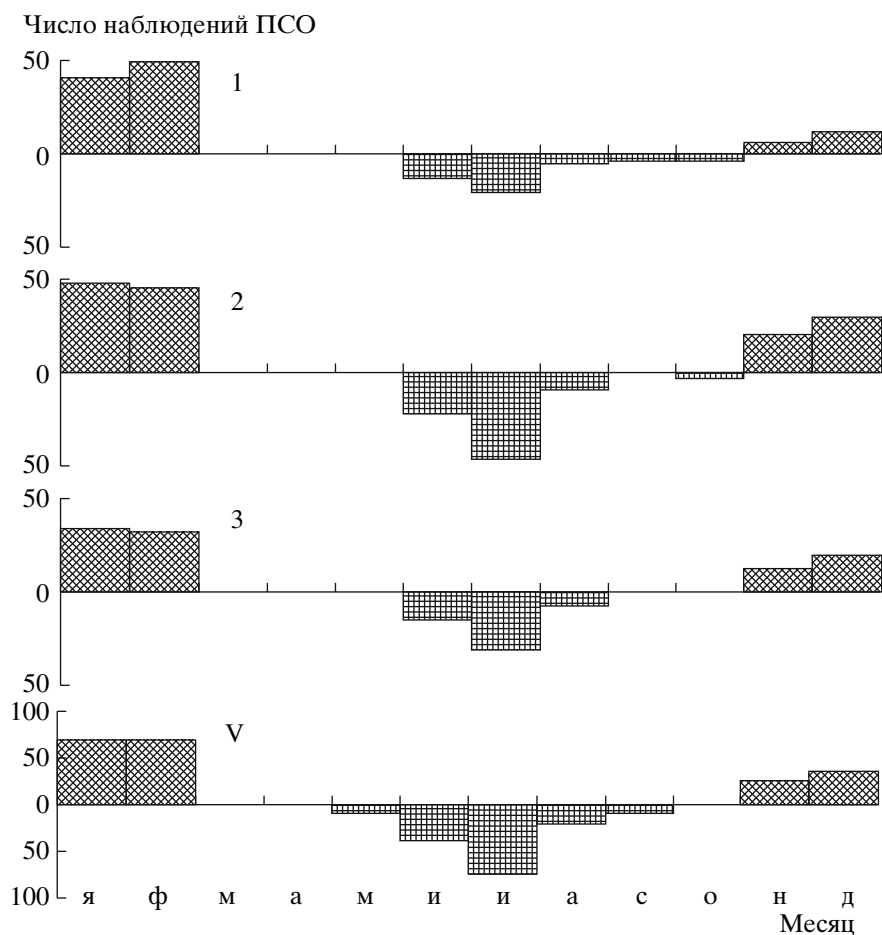


Рис. 2. Сезонное распределение числа случаев наблюдения ПСО за месячный интервал по различным критериям выделения ПСО. Части диаграмм выше осей абсцисс (косая штриховка) соответствуют Северному полушарию, нижние (прямая штриховка) – Южному.

ная матрица неопределенности (матрица погрешностей). Подчеркнем, что т.к. выборка, по которой строится решающий оператор, различна для разных критериев выбора ПСО, решающие операторы также различаются. Поэтому одному и тому же измерению при разных критериях отбора соответствуют различные решения (значения микрофизических параметров). Отметим также, что величины погрешностей измерений СКАО, определяющие компоненты матрицы Σ , индивидуальны для каждого измеренного значения СКАО и взяты нами в данных SAGE III уровня 2. Их величина колеблется от 3% до величин, существенно превосходящих измеренное значение. Мы рассматривали только те измерения, в которых эта погрешность менее 100%. Диагональные элементы матрицы \tilde{D} позволили оценить нижнюю границу погрешностей восстанавливаемых параметров, типичные значения которой составили для S и S_{NAT} около $0.4 \text{ мкм}^2/\text{см}^3$, а для V и V_{NAT} 1.2 и $2.8 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$ соответственно.

Описанная выше методика позволяет определять суммарные микрофизические параметры аэрозольно-облачной среды и компоненты ПСО – частиц NAT.

На рис. 3, 4 приведены временные зависимости интегральных площадей для всех облачно-аэрозольных частиц (рис. 3) и для частиц NAT (рис. 4). Мы не приводим соответствующих данных по интегральным объемам, т.к. они демонстрируют очень близкие пространственные и временные зависимости, а средние значения и среднеквадратичные отклонения объемов V приведены в табл. 5.

Из рис. 3, 4 видно, что в Северном полушарии наблюдается сильная межгодовая изменчивость общих площадей S и площадей частиц NAT S_{NAT} , которая позволяет предположить двухгодичную периодичность, хотя из-за ограниченности временного ряда наблюдений это предположение не подтверждено статистически. Эта изменчивость сильно коррелирует с низкими температурами в стратосфере. Так, например, зимой 2004–2005 гг. низкие температуры в районах измерений SAGE III

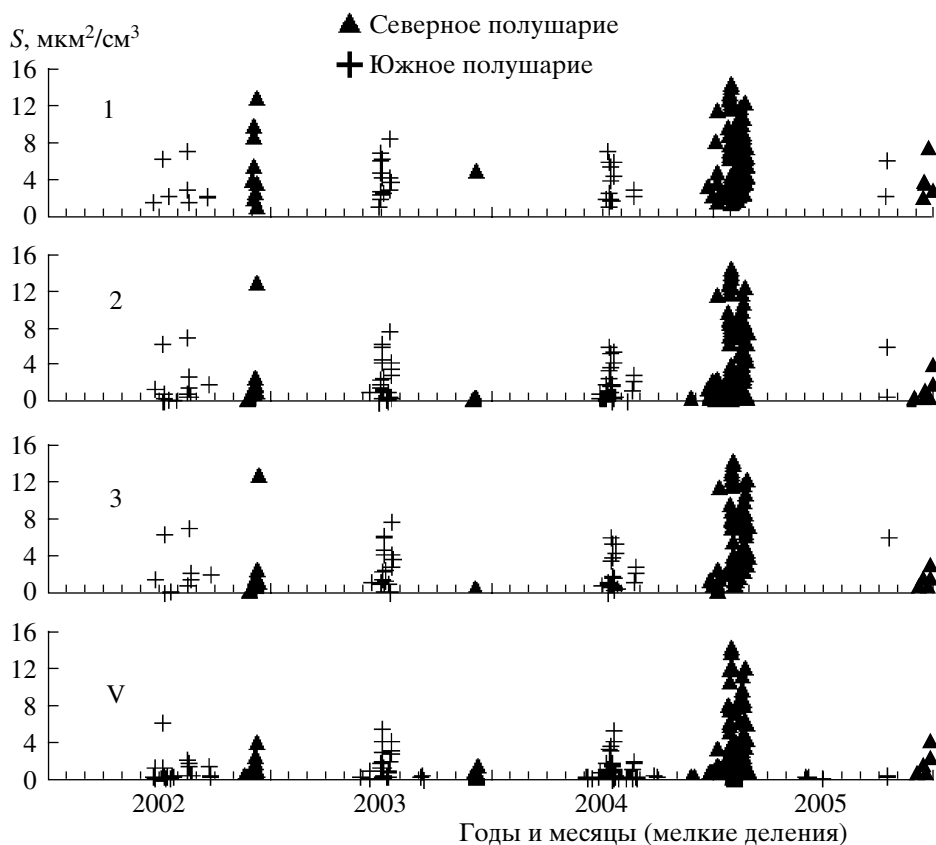


Рис. 3. Общая площадь всех частиц S по различным критериям выделения ПСО.

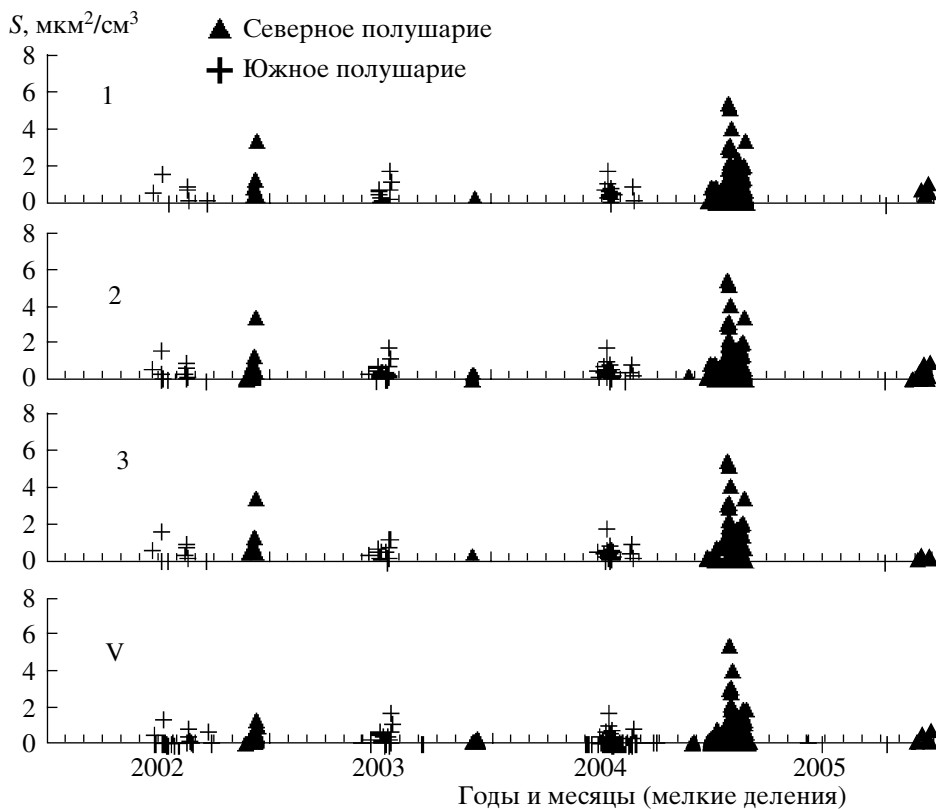


Рис. 4. Общая площадь частиц NAT S_{NAT} по различным критериям выделения ПСО.

Таблица 5. Характеристики ПСО, выделенных по различным критериям

Метод селекции	Верх, км	Низ, км	Толщина, км	Средняя высота, км	T , К	S , мкм ² /см ³	V , мкм ³ /см ³	S_{NAT} , мкм ² /см ³	V_{NAT} , мкм ³ /см ³
1	21.2	18.1	3.3	19.4	191.1	4.39	4.24	0.35	1.14
	2.5	3.0	2.2	2.8	2.35	2.52	3.38	0.81	1.83
2	22.6	19.7	2.7	21.0	192.0	2.35	2.20	0.38	1.0
	2.7	3.1	2.0	2.9	2.2	2.71	3.59	0.66	1.55
3	22.0	19.8	2.1	20.9	191.6	3.01	3.03	0.45	1.18
	3.1	3.2	1.6	3.0	2.2	3.07	4.20	0.82	1.90
V_3	21.8	20.5	1.3	20.6	192.4	1.83	1.78	0.41	1.13
	2.2	2.7	1.3	2.6	2.2	2.16	3.14	0.57	1.31

Примечание. В каждой клетке таблицы приведены средние значения (вверху) и СКО (внизу) для всего массива данных 2002–2005 гг.

наблюдались с начала декабря до конца февраля [30], что, вероятно, и обусловило наличие большого количества ПСО и высокие значения интегральных характеристик (см. рис. 3, 4). Малое число и невысокие значения площадей и объемов частиц ПСО зимой 2003–2004 гг. наоборот, можно объяснить относительно высокими значениями температуры стратосферы.

Рисунки 3 и 4, наряду с рис. 2, также могут быть использованы для анализа временной изменчивости числа наблюдений ПСО, т.к. на всех графиках показаны величины S и S_{NAT} только для моментов наблюдения ПСО по соответствующим критериям. Обычный период наблюдений ПСО – с конца ноября по декабрь. Иногда ПСО наблюдаются и в конце февраля. Для всех частиц (а иногда и для частиц NAT) период наблюдений ПСО – не только ноябрь–декабрь, но и конец февраля–начало марта.

Выделяется зима 2004–2005 гг. как продолжительностью периода наблюдений ПСО (с начала ноября до начала марта), так и большими значениями площадей частиц (как для ПСО, так и для всех частиц). Так, значения общей площади достигают величин 12–16 мкм²/см³. Значения S значительно больше значений S_{NAT} , что свидетельствует о вхождении в состав наблюдаемых ПСО и частиц с составом, отличным от кристаллогидратов азотной кислоты. Относительная доля частиц NAT в общих площадях преимущественно находится в пределах 20–60%. Наблюдаются также большие значения интегральных характеристик аэрозолей и ПСО в ноябре–декабре 2002 г. и малые – зимой 2003 г. Все это говорит о существенной межгодовой изменчивости ПСО, обусловленной, прежде всего, изменчивостью температуры стратосферы.

Картина наблюдений ПСО в Антарктике более равномерная по годам. (Возможно, это вызвано особенностями условий наблюдений в Южном полушарии – ограничением по времени и широте,

см. табл. 4). Период наблюдений ПСО в Южных широтах – начало июня–начало октября в 2002 г., май–октябрь в 2003 г., начало мая–октябрь в 2004 г. Этот период мал в 2005 г.: конец мая–начало июля.

В табл. 5 приведены некоторые статистические характеристики физических и микрофизических параметров облачно-аэрозольных частиц и частиц NAT для ПСО, отобранных по разным критериям. Столбцы табл. 5 представляют (последовательно, слева направо): критерии отбора в условных обозначениях (см. табл. 1), высоту верхней границы облака (ПСО) (следует иметь в виду, что указанная высота соответствует середине слоя толщиной 0.5 км, в котором наблюдается ПСО), высоту нижней границы облаков, толщину облачного слоя, высоту слоев, в которых наблюдается ПСО, температуру воздуха в ПСО, площадь суммарной поверхности всех частиц S (площадь всех фракций ПСО и фонового аэрозоля), суммарный объем тех же частиц V , суммарную поверхность частиц NAT S_{NAT} , суммарный объем тех же частиц V_{NAT} . Температура и интегральные микрофизические характеристики осреднены по всем наблюдениям ПСО, в том числе, по всем высотам наблюдения ПСО.

Несмотря на то, что отдельные характеристики ПСО (например, высоты) мало изменяются при использовании различных критериев выделения ПСО, микрофизические характеристики могут меняться в 1.5–2.0 раза. Величина изменчивости этих параметров является также, в какой-то мере, оценкой суммарной погрешности полученных нами микрофизических характеристик ПСО. Под суммарными погрешностями можно понимать такие, которые порождаются воздействием всех факторов, влияющих на значения полученных интегральных параметров стратосферного аэрозоля: погрешностью измерений СКАО, влиянием критерия выделения ПСО, адекватностью использованной априорной информации и т.д.

Анализ табл. 5 показывает, что для всех использованных в работе критериев выделения ПСО параметры собственно ПСО – как физические, так и микрофизические – оказываются в удовлетворительной степени взаимно близки. Так, верхняя граница облаков для трех критериев отбора отклоняется от среднего значения менее, чем на 0.4 км, нижняя – на 1.2 км, температура на 0.7 К, S_{NAT} и V_{NAT} , являющиеся параметрами специфически облачных частиц, – менее, чем на 20%. Таким образом, эти данные можно с достаточной достоверностью рассматривать как оценку параметров ПСО, а разброс приведенных данных характеризует в определенной степени погрешности полученных характеристик.

3.5. Сравнение с результатами других работ

Имеется довольно много публикаций о наблюдениях ПСО в различные годы разными методами. Так, в работе [13] анализируются результаты наблюдений аппаратуры SAM II (1978–1979 гг.) Отмечается появление ПСО в Антарктике – от середины мая до раннего ноября, в Арктике – от конца ноября до начала марта, что хорошо согласуется с нашими данными (см. рис. 2, 4) с учетом того, что SAGE III выполняет измерения в ограниченном широтном поясе и в ограниченные периоды времени (раздел 3.1). А именно, по нашим данным максимум вероятности появления ПСО в Северном полушарии – с конца января по начало февраля, в Южном – июль. Указанные в рассматриваемой публикации наиболее вероятные долготы появления ПСО ($\pm 90^\circ$ от Гринвича в обоих полушариях) также хорошо согласуются с нашими результатами (см. рис. 1.). В работе [16] при анализе измерений ROAM II в Арктике в зимние сезоны 1993–1996 гг. также отмечена локализация ПСО в ноябре–апреле вблизи гринвичского меридиана, что соответствует нашим наблюдениям.

В работе [14] на основе наблюдений ROAM II в 1994–1997 гг. в Антарктике отмечается широкий максимум на 315° долготы (соответствует 45°W), что хорошо согласуется с нашими результатами для Южного полушария (см. рис. 1). По данным той же работы средняя высота ПСО в мае составляет 24 км, что на 3–4 км превышает полученные нами результаты.

В работе [11] описаны результаты прямых аэростатных измерений некоторых характеристик ПСО. Отмечается изменение физических и микрофизических свойств ПСО с высотой, что согласуется с различными параметрами облаков (высоты, микрофизические параметры и т.д., см. табл. 5), полученными нами при использовании различных критериев их выделения (достаточно очевидно, что различные критерии выделяют различающиеся типы частиц облаков). В работе приводятся химические, микрофизические и оптические характеристики ПСО. Для нас

представляет интерес приведенный в графическом виде объем всех частиц в измерениях 25 января 2000 г. Значения этой величины меняются в облаке от десятых долей до $10 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$, что не противоречит данным табл. 4 (максимальные средние в слое толщиной 500 м значения $1.8\text{--}4.1 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$). В статье [5] по данным ROAM III в 1999–2000 гг. в Арктике отмечены высоты ПСО 18–23 км и максимум частоты наблюдений ПСО в январе.

В работе [17] по данным измерений аппаратуры MIPAS выполнен анализ эволюции полярного вихря и ПСО в течение зимы 2002–2003 гг. Анализ состава ПСО показал наличие частиц NAT в декабре, но малое их количество в последующее время. Этот вывод хорошо согласуется с нашими результатами, представленными на рис. 4. На этом рисунке видно, что, в отличие от зимы 2004–2005 гг., в 2002–2003 гг. практически все ПСО, наблюдаемые SAGE III, приходятся на начало декабря.

В работе [31] приведена климатология ПСО по лидарным измерениям на о. Шпицберген в 1994–2004 гг. За этот период было 5 зим, когда стратосферные температуры над Скандинавией были достаточно низки для образования ПСО. Типичные высоты наблюдаемых облаков, 20–24 км, фактически совпадают с нашими данными.

Таким образом, можно заключить, что параметры ПСО по наблюдениям SAGE III в основном хорошо согласуются с данными более ранних независимых измерений.

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены и испытаны на модельных и реальных данных различные критерии выделения ПСО, использующие измерения спектрального коэффициента аэрозольного ослабления. Предложен новый критерий, основанный на статистическом моделировании ПСО и ФСА. Показано, что использование разных критериев может приводить к различию выделяемых ансамблей ПСО, что, несомненно, может в определенной степени влиять на получаемые климатологические характеристики ПСО. Целесообразно использовать в этих методиках не только результаты измерений СКАО, но и дополнительные данные, в частности, температуру стратосферы.

2. Проанализированы сезонные, межгодовые и долготные вариации частоты появления ПСО в полярных районах обоих полушарий по данным измерений спутникового прибора SAGE III в период с марта 2002 г. по декабрь 2005 г. Показано, что в соответствии с более ранними исследованиями, наиболее вероятно появление ПСО в зимнее время – период декабрь–февраль в Северном полушарии и июнь–август в Южном полушарии. Наблюдаются значительные межгодовые вариации

частоты появления ПСО и их интегральных микрофизических характеристик. В частности, зимой 2004–2005 гг. отмечены особенно большое количество ПСО и высокие значения общих площадей и объемов ПСО. Определены долготы наиболее вероятного появления ПСО. В Северном полушарии ПСО наблюдаются в долготном секторе $120^{\circ}\text{W}–100^{\circ}\text{E}$ с максимумом частоты появления вблизи Гринвичского меридиана. Большая часть ПСО наблюдаются в секторе $\pm 80^{\circ}$ вокруг нулевого меридиана. В Южном полушарии положение области обнаружения ПСО по долготе почти такое же, но с некоторым сдвигом области максимума частоты появления ПСО на запад. Максимум наблюдается вблизи 40°W , обычная область обнаружения ПСО – $40^{\circ}\text{W} \pm 60^{\circ}$.

3. Определены средние значения и вариации высоты ПСО в Северном и Южном полушариях. В районах и периодах измерений прибора SAGE III средняя высота нижней и верхней границ ПСО составила 19.5 ± 1 и 21.9 ± 0.6 км соответственно при СКО 3.0 и 2.6 км. Средняя температура в облаках составила 191.8 ± 0.5 К, при СКО 2.2 К. Средняя толщина облаков 2.4 ± 0.9 км при СКО 1.8 км.

4. Методом линейной регрессии решена обратная задача определения интегральных микрофизических характеристик ПСО: общих площадей и объемов как всех частиц аэрозольно-облачных образований, так и частиц NAT. Оценки средних интегральных микрофизических параметров ПСО по всему периоду наблюдений (2002–2005 гг.) дали следующие значения: суммарная поверхность частиц NAT $S_{\text{NAT}} = 0.41 \pm 0.04$ мкм²/см³, при среднеквадратичном отклонении 0.8 мкм²/см³, суммарный объем частиц NAT $V_{\text{NAT}} = 1.1 \pm 0.1$ мкм³/см³, при среднеквадратичном отклонении менее 1.8 мкм³/см³. Для всех облачных и аэрозольных частиц в объеме ПСО $S = 2.9 \pm 1.5$ при среднеквадратичном отклонении 2.7 мкм²/см³, $V = 2.8 \pm 1.5$ при среднеквадратичном отклонении 4.2 мкм³/см³.

5. Проведено сопоставление полученных данных с результатами более ранних исследований характеристик ПСО с помощью лидарных, аэростатных (прямых) и спутниковых наблюдений. Получено хорошее согласие со всеми рассмотренными данными по пространственно-временному положению, физическим и интегральным микрофизическим параметрам аэрозольно-облачных образований.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №№ 05-05-65305-а и 06-05-64909-а), а также грантов Минобрнауки РНП.2.1.1.4166 и РНП.2.2.1.1.3836. Данные SAGE III предоставлены the NASA Langley Research Center Atmospheric Sciences Data Center.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Solomon S., Garcia R.R. et al. On the depletion of Antarctic ozone // *Nature*. 1986. V. 321. P. 755–758.
2. World Meteorological Organization (WMO), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994, WMO Report 37, Geneva, 1995.
3. Sloan L.C., Pollard D. Polar stratospheric clouds: A high latitude warming mechanism in an ancient greenhouse world // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. № 18. P. 3517–3520.
4. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric chemistry and physics. From air pollution to climate change John Wiley & Sons, Inc., New York–Chichester–Weinheim–Brisbane–Singapore–Toronto. 1998. 1326 p.
5. Strawa A.W., Drdla K., Fromm M. et al. Distinguishing Types Ia and Ib polar stratospheric clouds in POAM satellite data // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № D20. P. 8291. doi:10.1029/2001JD000458.
6. Drdla K. Applications of a model of polar stratospheric clouds and heterogeneous chemistry, Ph. D. thesis, UCLA, 1996.
7. Drdla K., Shoeberl M.R., Browell E.V. Microphysical modeling of the 1999–2000 Arctic winter // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № D5. P. 8312.
8. Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В. и др. Моделирование полярных стратосферных облаков: I. Микрофизические характеристики // *Оптика атмосферы и океана*. 2005. Т. 18. № 3. С. 264–269.
9. Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В. и др. Моделирование полярных стратосферных облаков: II. Статистика спектрального коэффициента ослабления и возможности дистанционного зондирования ПСО // *Оптика атмосферы и океана*. 2005. Т. 18. № 7. С. 586–591.
10. McCormick M.P., Steele H et al. Polar stratospheric cloud sighting by SAM II // *J. Atmos. Sci.* 1982. V. 39. P. 1387–1397.
11. Schreiner J., Voigt C. et al. Chemical, microphysical and optical properties of polar stratospheric clouds // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № D5. P. 8313. – doi: 10.1029/2001JD000825.
12. McCormick M.P., Trepte C.R. et al. Persistence of polar stratospheric clouds in southern polar region // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. № D9. P. 11241–11251.
13. Poole L.R., Pitts M.C. Polar stratospheric cloud climatology based on Stratospheric Aerosol Measurement II observations from 1978 to 1989 // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. № D6. P. 13083–13089.
14. Fromm M.D., Lumpe J.D. et al. Observation of Antarctic polar stratospheric clouds by POAM II: 1994–1996 // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. № D19. P. 23659–23672.
15. Kim Y., Choi W., Lee K.-M. et al. Polar stratospheric clouds observed by the ILAS-II in the Antarctic region: Dual compositions and variation of compositions during June to August of 2003 // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 111. № D13S90, doi:10.1029/2005JD006445.
16. Massie S.T., Baumgardner D., Dye J.E. Estimation of polar stratospheric cloud volume and area densities from UARS, stratospheric aerosol measurement II, and polar ozone and aerosol measurement II extinction data // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № D5. P. 5773–5784.
17. Spang R., Remedios J.J., Kramer L.J. et al. Polar stratospheric cloud observations by MIPAS on ENVISAT: de-

- tection method, validation and analysis of the northern hemisphere winter 2002/2003 // *Atmos. Chem. Phys.* 2005. V. 5. P. 679–692.
18. Polyakov A.V., Timofeyev Yu. M., Ionov D.V. et al. Newchurch Retrieval of ozone and nitrogen dioxide concentration from Stratospheric Aerosol and Gas Experiment III (SAGE III) measurement using a new algorithm // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. № D06303. doi:10.1029/2004JD005060
 19. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Ионов Д.В. и др. Новая интерпретация измерений прозрачности спутниковым спектрометром SAGE III // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2005. Т. 41. № 3. С. 410–422.
 20. Чайка А.М., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В. Стратосферный аэрозоль по данным измерений аппаратуры SAGE III // *Исследование Земли из космоса.* 2007. № 2. С. 10–18.
 21. Kent G.S., McCormick M.P. Separation of cloud and aerosol in two-wavelength satellite occultation data // *Geophys. Res. Lett.* 1991. V. 18. № 3. P. 428–231.
 22. Pitts M.C., Poole L.R., McCormick M.P. Climatology of Polar Stratospheric Clouds Determined From SAM II Observations / Digest of Topical Meeting on Optical Remote Sensing of the Atmosphere, 1990, Optical Society of America, Washington, D.C. 1990. V. 4. P. 206–209.
 23. Yue G.K., McCormick M.P., Chu W.P. Retrieval of composition and size distribution of stratospheric aerosol with the SAGE II satellite experiment // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 1986. V. 3. P. 371–380.
 24. Hitchman M.H., McKay M., Trepte C.R. A Climatology of Stratospheric Aerosol // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. № D10. P. 20689–20700.
 25. Kent G.S., Wang P.-H., Skeens R.M. Discrimination of cloud and aerosol in the Stratospheric Aerosol and Gas Experiment III occultation data // *Appl. Opt.* 1997. V. 36. № 33. P. 8639–8649.
 26. Kent G.S., Trepte C.R. et al. Problems in separating aerosol and clouds in the Stratospheric Aerosol and Gas Experiment (SAGE) II data set under conditions of lofted dust: Application to the Asian deserts // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № D14. P. 4410. doi:10.1029/2002JD002412.
 27. Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В. и др. Анализ решений обратной задачи восстановления микроструктуры стратосферного аэрозоля по спутниковым измерениям // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2006. Т. 42. № 6. С. 816–829.
 28. Hipskind S., Gaines S. (ed.) Airborne Arctic Stratospheric Expedition (CD-ROM), NASA Ames Research Center, 1990.
 29. Gaines S. (ed.) Airborne Southern Hemisphere Ozone Experiment and Measurements for Assessing the Effects of Stratospheric Aircraft (CD-ROM), NASA Ames Research Center, 1995.
 30. Сайт интернета www.cpc.ncep.gov/products/stratosphere
 31. Massoli P., Maturilli M., Neuber R. Climatology of Arctic polar stratospheric clouds as measured by lidar in Ny-A°lesund, Spitsbergen (79°N, 12°E) // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. № D09206. doi:10.1029/2005JD005840.

Polar Stratospheric Clouds from Satellite Observational Data

A. V. Polyakov, Yu. M. Timofeev, and Ya. A. Virolainen

Research Institute of Physics, St. Petersburg State University, Ul'yanovskaya ul. 1, Petrodvorets, 198904 Russia
e-mail: tim@troll.phys.spbu.ru

Abstract—The spectral aerosol-attenuation coefficients (SAACs) obtained from SAGE III measurements are used to study the physical and integral microphysical characteristics of polar stratospheric clouds (PSCs). Different criteria for PSC identification from SAAC measurements are considered and analyzed based on model and field measurements. An intercomparison of them is performed, and the agreement and difference of the results obtained with the use of different criteria are shown. A new criterion is proposed for PSC identification, which is based on the estimate of how close the measured vector of the spectral attenuation coefficient is to a model distribution of the PSC ensemble. On the basis of different criteria, cases of PSCs are isolated from all SAGE III observations (over 30 000). All selection criteria lead to a qualitatively and quantitatively similar space–time distribution of the regions of PSC localization. The PSCs observed in the region accessible to SAGE III measurements are localized in the latitudinal zones 65°–80° in the Northern Hemisphere and 45°–60° in the Southern Hemisphere during the winter–spring period. In the Northern Hemisphere, PSCs are observed within the longitudinal zone 120° W–100° E with the maximum frequency of PSC observation in the vicinity of the Greenwich meridian. In the Southern Hemisphere, the region of PSC observation is almost the same in longitude but with a certain shift in the maximum frequency of PSC observation to the west. This maximum is observed in the vicinity of 40° W, and the region of usual PSC observation is the neighborhood of 60° of the maximum's longitude. The physical parameters of PSCs are estimated: the mean heights of the lower and upper boundaries of PSCs are 19.5 and 21.9 km, respectively, and the mean cloud temperature is 191.8 K. The integral microphysical parameters of PSCs are estimated: the total surface of NAT particles $S_{\text{NAT}} = 0.41 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$; the total volume of NAT particles $V_{\text{NAT}} = 1.1 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$; and, for all aerosol and cloud particles together, S is 2.9×1.5 at a standard deviation of $2.7 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ and V is 2.8×1.5 at a standard deviation of $4.2 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$. A high frequency of PSC occurrence and high values of S and V in PSCs both for all particles and for NAT particles have been noted in January–February 2005 as compared to the rest of the period of SAGE III measurements for 2002–2005.