

УДК 551.510.41

Л. М. Белокриницкая¹, И. Л. Галкина², Г. М. Крученицкий²

Особенности вертикального распределения озона в канун весенней антарктической аномалии

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка

²Центральна аерологічна обсерваторія Росгідромету, Долгопрудний, Росія

Надійшла до редакції 09.02.04

За даними, що одержані за допомогою супутникової ІК-метричної апаратури CRISTA, в період її місій 1994 та 1997 р.р., проаналізовані особливості вертикального розподілу відношення суміші озону напередодні весняної озонної антарктичної аномалії (ВОАА) та одразу після її завершення. Показано, що утворення глибоких мінімумів вертикального розподілу відношення суміші озону, яке раніше спостерігалось лише під час ВОАА на зайнятих нею територіях, починається не менш ніж за 3 тижні до початку ВОАА на значно більших висотах, ніж під час ВОАА, причому на всій позатропічній території Південної півкулі. Оскільки процес утворення вказаних мінімумів глибоко сягає в зону полярної ночі, можна з певністю стверджувати, що їхня поява не може бути пояснена лише фреоновою версією походження ВОАА. Встановлено, що утворення мінімумів відбувається в двох просторово рознесених діапазонах висот та тісно пов'язане з характером та впорядкованістю атмосферних рухів.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Явление весенней антарктической озонной аномалии (ВОАА), иногда называемой антарктической озонной дырой, продолжает привлекать внимание исследователей. В настоящее время, когда содержание фреонов в стратосфере достигло максимума, несостоятельность или, по меньшей мере, существенная неполнота «фреоновой» версии разрушения озона стала совершенно очевидной. Ход развития ВОАА на протяжении 2002 и 2003 гг. показал, что при практически неизменном содержании окиси хлора в стратосфере время существования аномалии, дефицит озона относительно фиксированного уровня в ней, размеры затронутой территории и иные параметры ВОАА могут различаться самым кардинальным образом. Поэтому в настоящее время на первый план выходит изучение динамических факторов формирования ВОАА, и в этой связи особый интерес вызывает период ее формирования. Так как основным источником информации о состоянии глобального поля озона является спутниковая аппаратура TOMS (Total Ozone Measurement

System), функционирующая с небольшим перерывом с 1978 г., то в качестве критерия возникновения ВОАА выбран упомянутый выше фиксированный уровень общего содержания озона (220 е. Д.). Использование более тонких критериев, которые могли бы зафиксировать начальную фазу ВОАА на основе анализа вертикального распределения озона (ВРО), сдерживается отсутствием регулярной информации о глобальных полях ВРО, так как систематические измерения этого параметра осуществляются лишь станциями баллонного зондирования, которые продуцируют глобальный поток информации на уровне 10—20 профилей ВРО в неделю, и спутниковой аппаратурой SAGE (до двухсот профилей в неделю). Эти показатели дают очень низкое по сравнению с аппаратурой TOMS (100—150 км по данным интернет) горизонтальное пространственное разрешение. По таким данным сложно рассчитывать, эффективно обнаруживать профили, соответствующие более тонким критериям диагностики ВОАА. Здесь мы имеем в виду особенность профилей ВРО, наблюдаемых в Антарктиде во время ВОАА. В работе [1] отмечено, что провал

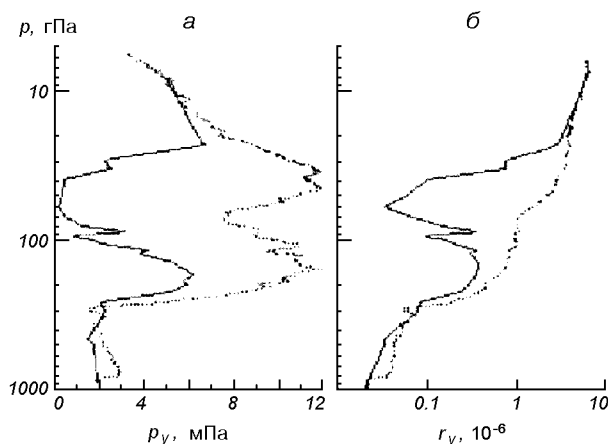


Рис. 1. Вертикальное распределение озона (а) и отношения смеси озона (б): пунктиры — наблюдения якутской аномалии 19 марта 1995 г. в Якутске, сплошные линии — наблюдения ВОАА 22 сентября 1998 г. на станции Сева

в максимуме концентрации озона наблюдается при озоновых аномалиях в различных регионах, а вот провал в максимуме отношения смеси озона — только в Антарктиде во время ВОАА. На рис. 1 из цитируемой работы приводятся профили ВРО (а) и отношения смеси (б), полученные в Якутске (62° с. ш., 120° в. д., 19 марта 1995 г. — пунктирная линия) во время самой сильной якутской озоновой аномалии и на японской антарктической станции Сева (69° ю. ш., 40° в. д., 22 сентября 1998 г. — сплошная линия) во время самой сильной ВОАА.

В настоящей работе предпринята попытка диагностировать раннюю фазу ВОАА с использованием этого критерия на основе данных двух краткосрочных миссий аппаратуры CRISTA (Cryogenic Infrared Spectrometers and Telescopes for the Atmosphere) [4]. Эта аппаратура обеспечивает поток профилей ВРО с пространственным разрешением по горизонтали, близким к соответствующим показателям TOMS.

ИСХОДНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для исследования начальной фазы формирования ВОАА привлекались как данные ВРО, полученные при баллонном зондировании атмосферы в полном объеме базы данных Мирового центра данных об озоне и УФ-радиации в Торонто (WOUDC), так и данные обеих миссий аппаратуры CRISTA. Аппаратура CRISTA записывает ИК-излучение малых газовых составляющих лимба атмосферы (O_3 , HNO_3 , CFC_{11} , N_2O , CH_4 , N_2O_5 , $ClONO_2$, NO_2) и определя-

ет по их интенсивности профили вертикального распределения этих газов. Этот прибор производит также измерение вертикального распределения температуры (по эмиссии молекулы CO_2) и давления атмосферы. К настоящему времени аппаратура CRISTA успешно осуществила две миссии. Первая из них выполнена с борта шаттла «Атлантис» с 4 по 12 ноября 1994 г., а вторая — с борта «Дискавери» с 8 по 16 августа 1997 г. В ходе первой миссии широтный охват зоны наблюдений составил около 58° от экватора, в ходе второй — 74° , а количество измеренных профилей ВРО — 43075 и 31436 соответственно. Почти все профили ВРО, привлекавшиеся для анализа, были обеспечены синхронными отсчетами температуры. Исключение составили примерно 200 профилей, измеренных на станции Payerne, для которых данные о температуре утеряны. Для обоснования эффективности предложенного критерия диагностики начальной фазы ВОАА была изучена степень уникальности провала в профиле отношения смеси озона. (Такие профили далее будем называть двухмодальными /дефектными, или сокращенно Д-профилями). Были проанализированы все профили отношения смеси, измеренные баллонным методом на всех внеантарктических станциях мировой сети, которые провели более 250 пусков с 1963 г. (начало регулярных баллонных измерений озона на мировой сети). Основные обстоятельства наблюдений приведены в таблице. Во избежание ложной диагностики Д-эффекта, обусловленной ошибками измерений, при

Станции баллонных измерений ВРО мировой сети

Номер п/п	Станция (номер)	Широта	Долгота	Число пусков
1	Kagoshima (7)	32	131	665
2	Sapporo (12)	43	141	603
3	Tateno (14)	36	140	903
4	Alert (18)	83	-62	619
5	Edmonton (21)	54	-114	960
6	Resolute (24)	75	-95	869
7	Boulder (67)	40	-105	1198
8	Goose Bay (76)	53	-60	1100
9	Curchill (77)	59	-94	863
10	Hohenpeisseberg (99)	48	11	3591
11	Wallops Island (107)	38	-75	452
12	Hilo (109)	20	-155	760
13	Payerne (156)	46	7	3682
14	Lindenberg (174)	52	14	1246
15	Naha (190)	26	128	434
16	Legionovo (221)	52	21	634
17	Laverton (254)	-38	145	360
18	Sodankyla (262)	67	27	628
Итого				19567

поиске профилей ВРО закладывалось требование, чтобы минимум, образовавшийся в результате Д-эффекта, не превышал по величине 50 % от меньшего из окружающих его максимумов, т.е. чтобы сам эффект составлял не менее 100 %. Из 19567 программно тестированных профилей оказалось всего 8 дефектных. Три из восьми профилей были измерены на станции Alert, остальные на станциях Resolute, Goose Bay, Hohenpeisseberg, Payerne и Laverton. Отметим, что лишь на двух из семи профилей есть температуры, при которых возможно образование полярных стратосферных облаков. Мы не станем обсуждать причины, по которым могли образоваться Д-профили, обнаруженные при баллонном зондировании, прежде всего потому, что по виду большинства этих профилей нельзя исключить возможность аппаратных сбоев.

Из анализа данных баллонного зондирования с уверенностью можно сделать лишь вывод о том, что дефектность профиля в диапазоне высот баллонного зондирования представляет собой чрезвычайно редкое явление вне зоны действия ВОАА.

АНАЛИЗ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И ЕГО РЕЗУЛЬТАТЫ

Чтобы изучить вопрос о том, насколько существование Д-профилей привязано по времени к ВОАА, с помощью специально разработанного программного обеспечения были проанализированы все профили ВРО, измеренные в ходе как второй миссии аппаратуры CRISTA (около трех недель до начала ВОАА 1997 г.), так и первой (первые дни после окончания ВОАА 1994 г.) на предмет выявления Д-профилей. Пример Д-профиля (с параллельными данными о ВРТ), измеренного аппаратурой CRISTA, приведен на рис. 2.

Всего таких профилей оказалось 511 (1.2 %) во время первой миссии и 475 (1.5 %) во время второй. Географическое расположение Д-профилей иллюстрирует рис. 3. Видно, что подавляющее большинство профилей во время второй миссии расположены во внетропических широтах Южного полушария, а распределение профилей во время первой миссии существенно ближе к равномерному с провалом в южной полярной области и выбросом в северной. Под высотой Д-профиля будем понимать высоту, на которой расположен минимум отношения смеси, разделяющий два максимума (например, на рис. 2 это 29 км). Высотное распределение Д-профилей имеет две интересные особенности. Во-первых, для обеих миссий оно является двухмодовым (рис. 3). Во-вторых, географическое

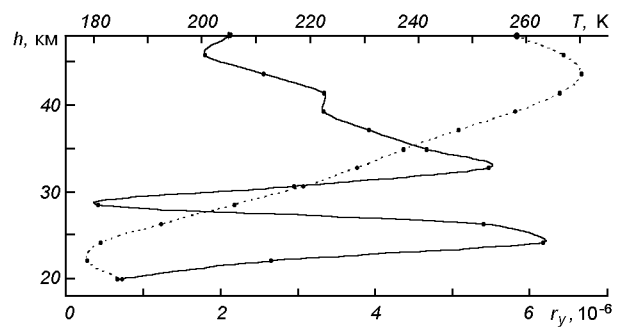


Рис. 2. Профиль отношения смеси с ярко выраженным Д-эффектом (сплошная линия) с данными о температуре (пунктир)

распределение высоты для первой миссии является квазислучайным (рис. 4, а), а для второй миссии оно сильно упорядочено вдоль меридианов (рис. 4, б). В распределении Д-профилей обращает на себя внимание то обстоятельство, что, по-видимому, некоторое количество таких профилей есть всегда, причем их минимумы расположены на высотах, превышающих высоты баллонного зондирования. Эти «заготовки для будущих дыр» в условиях замкнутой циркуляции (в циркумполярном вихре) успешно развиваются за счет нисходящих движений, а при разрушении вихря его обломки — «подвихри» — еще некоторое время содержат Д-профили. Результаты второй миссии убедительно свидетельствуют, что начальная фаза явления ВОАА возникает примерно на месяц раньше, чем это предполагалось, и на гораздо больших высотах, чем оно обычно наблюдалось. Дополнительного изучения, безусловно, заслуживает двухмодовость высотного распределения минимумов Д-профилей. Отметим то обстоятельство, что «высокие» Д-профили в основном примыкают к полюсу, находясь в области полярной ночи.

Из рис. 3 хорошо видно, что начальная фаза образования ВОАА затрагивает гораздо большую широтную зону, чем его основная фаза. Очевидно, дальнейшее развитие ВОАА может осуществляться только в специфических условиях изолированной воздушной массы циркумполярного вихря. Еще одно важное обстоятельство, связанное с начальной фазой развития ВОАА, состоит в том, что она имеет место и в тех широтных зонах, где в это время наблюдается полярная ночь, т. е. уничтожение озона по сопряженному с фреоновой версией механизму [3] невозможно. Разумеется, априори нельзя отрицать возможности образования Д-профилей вне зоны полярной ночи и их проникнове-

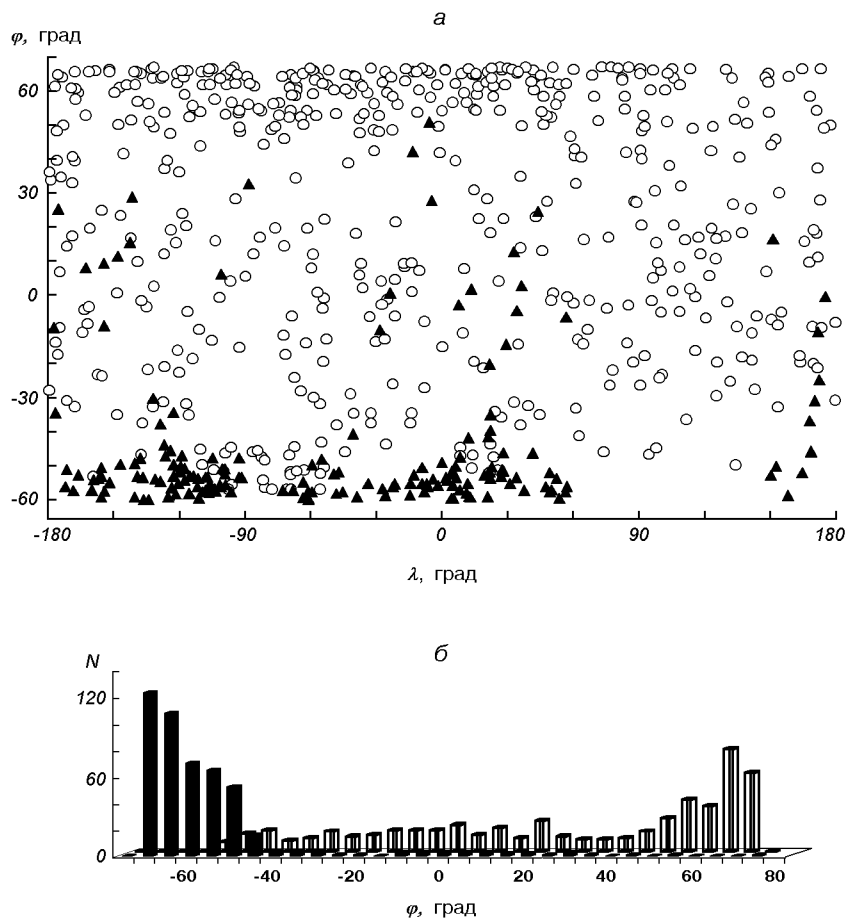


Рис. 3. Географическая привязка Д-профилей (а) и их распределение по широте (б). Светлые значки — первая миссия CRISTA, темные — вторая миссия

ния в эту зону за счет межширотного обмена. Но это означало бы серьезное нарушение изолированности циркумполярного вихря. По результатам первой миссии видно, что когда вихрь разрушен, межширотный обмен активно осуществляется за счет выноса субвихрей в область низких широт и даже за экватор. Впрочем, высокая степень «замороженности», изолированности и доминирования зональных движений гораздо в большей степени присущи южному циркумполярному вихрю, нежели северному. Процесс отделения «субвихрей» от последнего имеет место не только на стадии разрушения, но и на протяжении практически всего времени существования. Возможно, это объясняет (по меньшей мере отчасти) наличие Д-профилей с малой высотой минимума в Северной полушарии (темные области к северу от экватора на рис. 4, а.

ВЫВОДЫ

Явление весенней антарктической озоновой аномалии начинается по меньшей мере на 2-3 недели раньше, чем обнаруживается по снижению общего содержания озона ниже порогового уровня 220 е. Д., и развивается на высотах, гораздо больших, чем те, где минимум отношения смеси размещается в развитой фазе ВОАА.

Наличие двухмодальных профилей отношения смеси озона, ранее наблюдавшихся только во время ВОАА, практически во всей внетропической области Южного полушария свидетельствует о том, что механизм уничтожения озона во время ВОАА, основанный на вскрытии резервуара хлористого нитрида и высвобождении окисла хлора за счет гетерофазных реакций на поверхности частиц по-

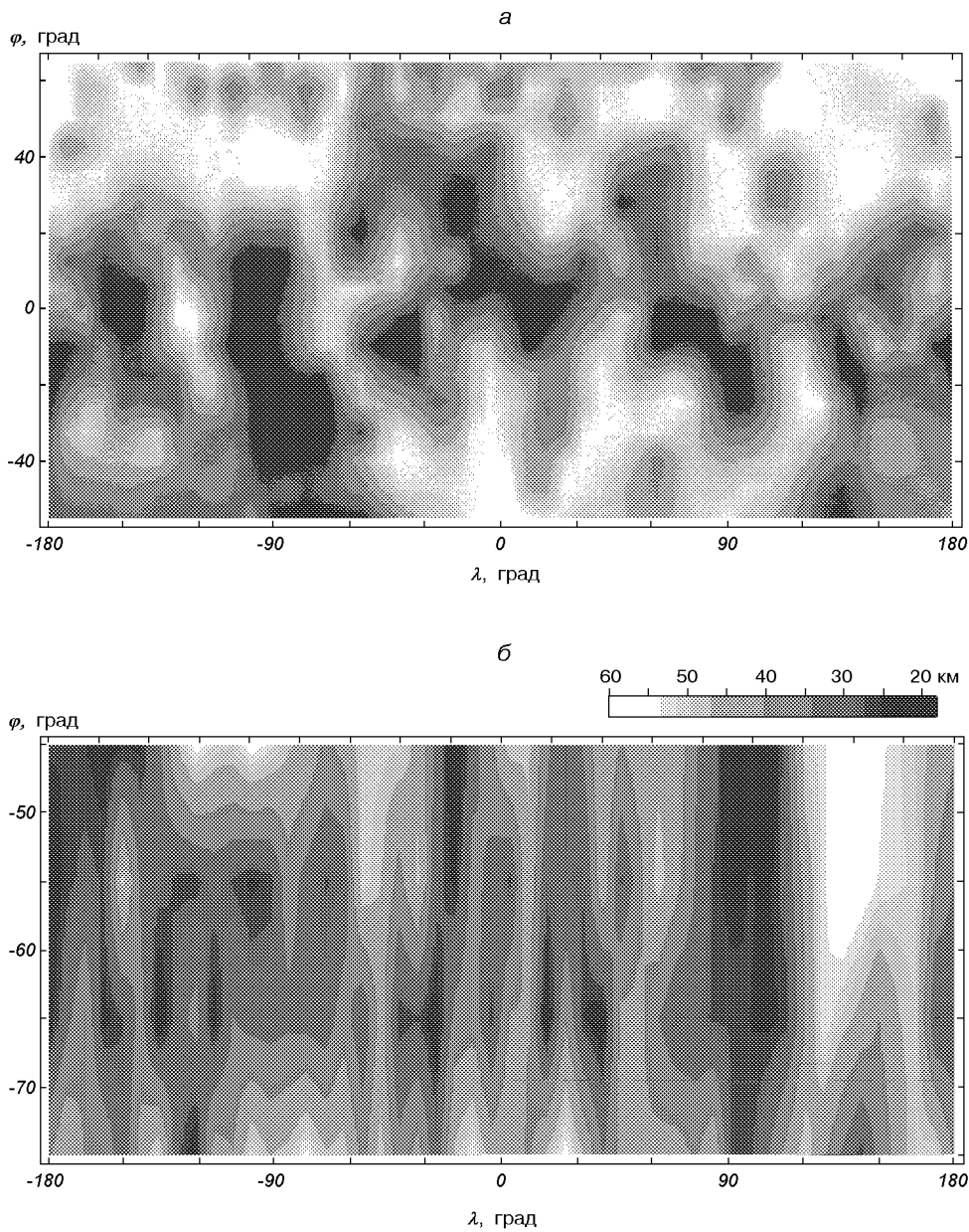


Рис. 4. Географическое распределение высот минимумов Д-профилей: *a* — первая миссия, *b* — вторая миссия

лярных стратосферных облаков (ПСО), явно не подходит для объяснения наблюдаемой ситуации. С одной стороны, сложно предположить наличие ПСО в умеренных широтах южного полушария, а с другой — Д-профили в области полярной ночи не могут быть объяснены с помощью этого механизма, так как он реализуется через фотохимические процессы.

В свете обнаружения Д-профилей ВРО наиболее вероятным представляется объяснение ВОАА, пред-

ложенное в работе [2]. Оно предполагает прямое разрушение молекул озона на частицах ПСО, поверхность которых активируется за счет процессов фотозонки в период антарктической весны. В рамках такого объяснения образование Д-профилей может также быть связано с прямым стоком озона на аэрозольные частицы различной природы, причем относительно малое количество Д-профилей в этом случае обусловлено отсутствием или незначительной интенсивностью процессов активации по-

верхности этих частиц. В таком случае Д-профили будут образовываться только за счет флюктуативно высоких концентраций стратосферного аэрозоля. Этот вопрос, как и вопрос о возможных альтернативных механизмах активизации его поверхности (например корпускулярном), безусловно заслуживает дальнейшего изучения.

1. Борисов Ю. А., Звягинцев А. М., Зуев В. В. и др. Тенденции изменений озонового слоя по наблюдениям с помощью спутниковой аппаратуры TOMS и наземной озонометрической сети // Изв. РАН. Исслед. Земли из космоса.—2000.—№ 6.—С. 23—32.
2. Звягинцев А. М., Зуев В. В., Крученицкий Г. М., Скоробогатый Т. В. О вкладе гетерофазных процессов в формирование весенней озоновой аномалии в Антарктиде // Изв. РАН. Исслед. Земли из космоса.—2002.—№ 3.—С. 29—34.
3. Anderson J. G., Brune W. H., Lloyd S. A., et al. Kinetics of O₃ destruction by ClO and BrO within the Antarctic vortex: An analysis based on in situ ER-2 data // J. Geophys. Res.—1989.—94.—P. 11480—11520.
4. Smith A. K., Riese M. Cryogenic Infrared Spectrometers and Telescopes for the Atmosphere (CRISTA) observations of

tracertransport by inertially unstable circulations // J. Geophys. Res.—1999.—104, N D16.—P. 19.171—19.182.

SINGULARITIES OF VERTICAL OZONE DISTRIBUTION BEFORE SPRING ANTARCTIC HOLE

L. M. Belokrinitska, I. L. Galkina, G. M. Kruchenitsky

Based on the data from the IR measuring instrument CRISTA which were obtained during its 1994 and 1997 missions, the Features of the vertical distribution of the ozone mixing ratio immediately prior to and upon the cessation of the springtime Antarctic ozone anomaly (SAOA) are analysed. It is shown the formation of marked minima in the vertical distribution of ozone mixing ratio which was observed only during the SAOA period over the territories affected by it begins no less than three weeks prior to the SAOA period at much higher altitudes than during the SAOA and essentially throughout the extratropical territory of the Southern Hemisphere. As the formation of the minima mentioned above affects largely the polar night's area as well, it is clear that their occurrence cannot be accounted for by the theory of freon-based SAOA formation. The minima formation is found to take place within remote altitude ranges and to be closely connected with character of ordered atmospheric motions.