

*Е.А. Бакулина, А.И. Угрюмов*

**ВЕСЕННИЕ ПЕРЕСТРОЙКИ ЦИРКУЛЯЦИИ В СТРАТОСФЕРЕ  
В 1958–2003 ГОДАХ**

*E. A. Bakulina, A. I. Ugryumov*

**SPRING RECONSTRUCTION CIRCULATION  
IN THE STRATOSPHERE IN 1958–2003**

*Осуществлен количественный анализ весенних сроков глобальной перестройки циркуляции в стратосфере. Объективно установлено существование 3 типов перестройки: ранние, средней и поздней. Проанализировано распределение сроков (типов) перестройки по годам с 1958–2003 г., таблица с данными прилагается.*

*Quantity analysis of spring terms of global reconstruction circulation in the stratosphere was realized. Results of the analysis confirm existence of 3 types reorganization: early, mean, late ones. Distribution of terms (types) reconstruction for the 1958–2003 period was analysed, table with the data is presented.*

Одним из самых крупных объектов общей циркуляции атмосферы является циркумполярный вихрь (ЦПВ). В свободной тропосфере он представлен планетарным циклоном с центром низкого давления около полюса, который обуславливает общее движение воздуха над полушарием с запада на восток. На этот общий западный перенос налагаются возмущения в виде длинных волн и вихревых образований – циклонов и антициклонов. На характеристики тропосферного ЦПВ сильно воздействует подстилающая поверхность, которая определяет его интенсивность и положение. Летом, когда температурный контраст океан-континент не очень велик, ЦПВ относительно симметричный, с одним центром, расположенным недалеко от полюса. Зимой при значительном возрастании контрастов океан-континент ЦПВ, как правило, имеет два центра низкого давления (Канадский архипелаг, полуостров Таймыр), а западно-восточный перенос оказывается сильно возмущенным в связи с развитием мощных гребней давления над океанами и глубоких ложбин – над континентами.

В стратосфере (выше уровня 100 гПа) существуют две сезонных разновидности ЦПВ: в холодную часть года, как и в тропосфере, здесь господствует планетарный циклонический вихрь с сопутствующим западно-восточным переносом (так же сильно возмущенным), а в теплую часть года все полушарие занято антициклоническим ЦПВ с центром высокого давления точно над полюсом. Во всей стратосфере формируется соответствующий распределению давления восточно-западный перенос [Пальмен, 1973; Погосян, 1972].

Процессы, приводящие к формированию двух абсолютно разных систем циркуляции в стратосфере зимой и летом имеют, в основном, радиационную природу. Зимой в полярной стратосфере в условиях полярной ночи и радиационного охлаждения образуется планетарный очаг холода и сопутствующая

ему область низкого давления – глубокий циклон, простирающийся от нижней границы стратосферы до 50 км и более. Окончание полярной ночи сопровождается быстрым прогревом полярной стратосферы, благодаря поглощению ультрафиолетовой радиации озоном в спектральном диапазоне 0,18–0,30 мкм. Над полюсом формируется очаг тепла, наблюдается интенсивный рост давления, который приводит к формированию планетарного антициклона [Атмосфера, 1991]. Отметим, что формирование летней циркуляции осуществляется сначала на верхних уровнях стратосферы (выше 10 гПа, 31 км), а затем распространяется вниз. Эта закономерность хорошо видна на рис. 1, из которого также следует, что ниже 50 гПа (20 км), в верхней тропосфере, и летом сохраняется циклоническая циркуляция [Педь, 1973].

Меридиональность циркуляции в летней стратосфере практически нулевая, изогипсы изобарических поверхностей параллельны кругам широты, зональный перенос строго восточный. Это означает, что в летней стратосфере господствуют условия лучистого равновесия.

С синоптической точки зрения образование летнего циркумполярного антициклона выражается в постепенном заполнении зимнего стратосферного циклона и одновременном движении к полюсу субтропических областей высокого давления – Атлантического и, чаще, Северо-Тихоокеанского стратосферных антициклонов, которые, выйдя на полюс, разрастаются далее до планетарного масштаба [Кац, 1968; Угрюмов, 1971].

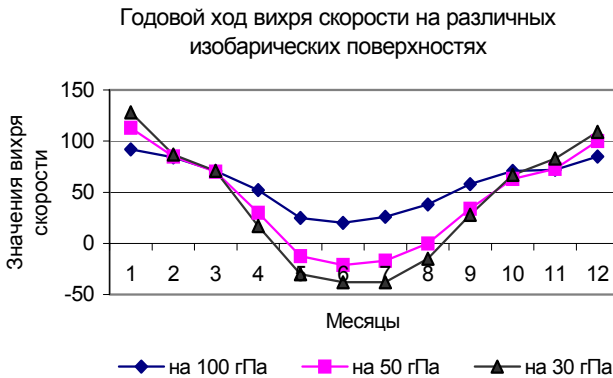


Рис. 1. Климатический сезонный ход значений планетарного вихря скорости на различных изобарических уровнях стратосферы.

При относительном постоянстве сезонного хода интенсивности солнечной радиации в умеренных и высоких широтах следует ожидать, что и срок весенней перестройки циркуляции в стратосфере из года в год должен меняться мало. Однако уже в первых работах по динамике стратосферы было установлено, что этот срок испытывает значительные межгодовые колебания в пределах двух месяцев – от середины марта до почти что середины мая [Громова, 1964; Пчелко 1959; Угрюмов, 1971; Miers, 1987]. Следовательно,

в формировании летней стратосферной циркуляции принимают участие не только относительно постоянные радиационные факторы, но и другие процессы, влияющие на тепловой баланс стратосферы. В частности, А.И. Угрюмов показал [Угрюмов, 1971], что ранние перестройки происходят на фоне усиленного межширотного обмена, который приводит к дополнительному адвективному потеплению полярной стратосферы, ускоряя тем самым процесс формирования летнего циркумполярного антициклона.

Заблаговременный прогноз сроков весенней перестройки может иметь большое значение для ряда направлений метеорологического обслуживания. Планирование полетов высотной авиации в марте-мае должно учитывать тип атмосферной циркуляции в верхних слоях (зимний циклонический или летний антициклонический). В ряде работ по долгосрочному прогнозу погоды были установлены связи между сроками весенней перестройки в стратосфере и характером погоды в Европе в весенне-летние месяцы [Педь, 1973; Угрюмов, 1971; Ebdon, 1966]. Тем не менее, надежных методов прогноза сроков весенней перестройки стратосферной циркуляции до сих пор не существует.

Задача прогноза сроков весенней перестройки в стратосфере может быть решена на основе динамических моделей стратосферной циркуляции, построенных с учетом всех действующих факторов сезонного прогрева полярной стратосферы: радиация, количество озона и других радиационно-активных газов, межширотный обмен теплом, влияние вертикальных движений. Есть основания полагать [Угрюмов, 1971], что физическое содержание моделей перестроек (роль отдельных влияющих факторов) будет зависеть от их сроков. Сейчас принято делить перестройки по срокам на ранние (вторая половина марта), средние (апрель) и поздние (первая половина мая). Однако деление это чисто феноменологическое, для обоснованного, количественного решения вопроса типизации весенних стратосферных перестроек необходимо проанализировать статистическое распределение сроков перестройки за максимальный возможный ряд лет. Именно это и составляет задачу настоящей работы.

Для анализа статистического распределения сроков весенней перестройки стратосферной циркуляции мы располагаем ее датами за 46 лет, с 1958 по 2003 г. (табл. 1). Однако эти даты в разные годы определялись разными методами. Рассмотрим коротко эти методы, чтобы определить, насколько однороден анализируемый ряд данных.

Ежегодные даты перестройки с 1958 по 1969 г. включительно взяты из работы А.И. Угрюмова [Угрюмов, 1971]. Автор использует индекс зональной циркуляции атмосферы А.Л. Каца, рассчитанный на изобарической поверхности 10 гПа (31 км) для каждой пятидневки февраля-июня упомянутых лет. Индекс зональности  $I_3$  представляет собой градиент геопотенциала изобарической поверхности в меридиональном направлении и выражается в геопотенциальных декаметрах на  $1^\circ$  меридиана (гп.дам/град.мерид.). Расчетная формула для  $I_3$  в широтной зоне от  $30^\circ$  с.ш. до  $75^\circ$  с.ш.: имеет вид:

$$I_3 = \frac{H_1 - H_2}{\varphi_2 - \varphi_1}, \quad (1)$$

где  $(H_1 - H_2)$  – разность осредненных по всему полушарию значений геопотенциала на соответствующих широтах.

При  $(H_1 - H_2) > 0$  в стратосфере полушария преобладает западно-восточный перенос (циклоническая циркуляция), при  $(H_1 - H_2) < 0$  – восточно-западный перенос (антициклоническая циркуляция). Дата весенней перестройки циркуляции однозначно определяется как момент перехода значений  $I_3$  через ноль.

Ежегодные даты весенней перестройки в 1970 – 2003 гг. определялись по методу Д.А. Педя [Педь, 1973] с использованием временного хода значений планетарного вихря скорости на той же изобарической поверхности 10 гПа. При использовании для вычисления данных о геопотенциале выражения для вихря скорости ( $\Omega$  <sup>1</sup>/сек) имеет следующий вид:

$$\Omega = \frac{10g}{L\nabla^2 H} = \frac{10g4(H - H_0)}{Lr^2}, \quad (2)$$

где  $H = n \sum H_i$ ;

$L$  – параметр Кориолиса;  $g$  – ускорение свободного падения;  $H$  – средняя величина абсолютного геопотенциала  $H_i$  (гп.дкм) вдоль окружности радиуса  $r$  (вдоль параллели  $\varphi = 40^\circ$  с.ш.);  $H_0$  – значение геопотенциала на полюсе.  $r$  – расстояние между полюсом и широтой  $40^\circ$  с.ш.

Поскольку переменной по времени в данной формуле является только разность  $(H - H_0)$ , для практических целей определения даты перестройки Педь рекомендовал использовать именно эту разность как величину, пропорциональную планетарному вихрю скорости. При  $(H - H_0) > 0$  наблюдается циклонический вихрь и соответствующий ему западно-восточный перенос. При  $(H - H_0) < 0$  отмечается антициклонический вихрь и восточно-западный перенос. Срок перестройки определяется как дата перехода разности  $(H - H_0)$  к отрицательным значениям.

Рассмотрев два способа определения времени весенней перестройки циркуляции в стратосфере, можно сделать вывод, что в обоих способах используется временной ход очень близких по физическому смыслу величин. Это планетарный меридиональный градиент геопотенциала в гп.дам/1°широты [Угрюмов, 1971] и также планетарная меридиональная разность геопотенциала между низкими и высокими широтами [Педь, 1973]. Последний показатель легко превратить в первый, разделив его на разность широт и получив тем самым градиент геопотенциала в гп.дам/1°широты. Главное, что в обоих показателях переменной частью является одна и та же величина – средняя по полушарию меридиональная разность геопотенциала.

Единственным различием двух приведенных способов является несовпадение областей расчета показателей зональной циркуляции:  $40\text{--}90^\circ$  широты у Педя и  $30\text{--}75^\circ$  широты у Угрюмова. Однако его вряд ли можно считать значи-

мым, потому что обе области полностью включают в себя зону наибольших сезонных изменений стратосферной циркуляции. Упомянутое различие может, конечно, привести к небольшим различиям в определении даты перестройки (1–3 дня), но тип перестройки – ранняя, средняя, поздняя – при межгодовом разбросе дат в два месяца обоими способами будет определен однозначно. Таким образом, на основании изложенного будем считать привлеченный для исследования временной ряд сроков весенней перестройки циркуляции в стратосфере (табл. 1) однородным.

Таблица 1

**Типы и даты весенних перестроек циркуляции в стратосфере Северного полушария на уровне 10 гПа (31 км) в 1958–2003 гг.**

Типы перестроек		
Ранние	Средние	Поздние
1959 – 20 марта	1960 – 17 апреля	1958 – 10 мая
1961 – 15 марта	1965 – 18 апреля	1962 – 1 мая
1964 – 19 марта	1966 – 25 апреля	1963 – 10 мая
1972 – 25 марта	1969 – 16 апреля	1967 – 27 апреля
1974 – 23 марта	1970 – 11 апреля	1968 – 28 апреля
1975 – 18 марта	1971 – 24 апреля	1973 – 12 мая
1976 – 31 марта	1979 – 8 апреля	1981 – 13 мая
1977 – 29 марта	1982 – 6 апреля	1987 – 1 мая
1978 – 25 марта	1988 – 8 апреля	1990 – 12 мая
1980 – 9 марта	1989 – 18 апреля	1997 – 29 апреля
1983 – 18 марта	1991 – 10 апреля	1999 – 1 мая
1984 – 13 марта	1993 – 13 апреля	2001 – 9 мая
1985 – 28 марта	1995 – 17 апреля	2002 – 8 мая
1986 – 22 марта	1996 – 10 апреля	
1992 – 24 марта	2000 – 11 апреля	
1994 – 3 апреля	2003 – 17 апреля	
1998 – 28 марта		

На рис. 2 представлена гистограмма повторяемости сроков перестройки по декадам марта–мая за все 46 лет. Прежде всего, отмечается явно выраженная многомодальность гистограммы, которая отражает существование установленных ранее трех временных групп перестройки: раннюю, среднюю и позднюю. Надо отметить, что статистическая значимость модальных значений повторяемости (пиков гистограммы) неодинакова: для ранних (20–31 марта) и средних (10–20 апреля) перестроек она достигает 95%, а для поздних (1–10 мая) – менее 70%. Однако объединять средние и поздние перестройки в одну группу мы посчитали нецелесообразным, поскольку разброс дат при этом будет очень велик – почти полтора месяца.

Наличие трех мод на гистограмме повторяемости сроков весенней перестройки стратосферной циркуляции, очевидно, свидетельствует и о том, что существуют три разных физических механизма перестройки, три модели ее, с разным весом влияющих на срок перестройки факторов. Поэтому в целях

прогноза срока перестройки необходимо исследовать основные влияющие факторы в каждой из трех предполагаемых моделей.

В целях объективного разделения сроков перестройки на ранние, средние и поздние было выдвинуто предположение, что статистическое распределение повторяемости сроков в каждой из групп в пределе стремится к нормальному, некоторые отличия от закона нормального распределения, обнаруживающиеся на гистограмме (ранние и поздние перестройки), скорее всего, вызваны ограниченностью выборки. К сожалению, до 1958 г. регулярные наблюдения за полем давления и циркуляцией в стратосфере отсутствуют, они стали возможны лишь после проведения Международного геофизического года 1957–1958 гг.

На рис. 2 представлена аппроксимация трех гистограмм повторяемости сроков перестройки – ранних, средних и поздних – нормальным законом статистического распределения [Казакевич, 1977]. Для расчета теоретической повторяемости суммарная гистограмма повторяемости была разделена на три отдельные, при этом данные в грациях 1–10 и 20–30 апреля использовались дважды – для каждого из смежных типов перестройки.

Очевидно, что теоретические даты, разделяющие перестройки по сроку на ранние, средние и поздние, будут соответствовать датам, при которых пересекаются кривые нормального распределения. Таковыми являются: 5 апреля – граница между ранними и средними по сроку перестройками и 26 апреля – граница между средними и поздними перестройками. Деление это в некотором смысле условно, очевидно, существуют переходные периоды между «чистыми» типами перестроек, но установить их можно будет только после анализа факторов, приводящих к тому или иному типу перестройки.

В соответствии с данными критериями все эмпирические даты перестройки в 1958–2003 гг. были разделены на три класса, которые представлены в табл. 1. Анализ временного хода повторяемости сроков перестройки обнаруживает некоторые интересные особенности. Весь временной ряд можно разделить на три близких по продолжительности периода. В первом их них (1958–1974 гг.) явно преобладали средние и поздние перестройки (12 лет из 16-ти), причем отмечалось определенное чередование типа перестройки по годам. Близкая ситуация наблюдалась и в третьем периоде с 1987 по 2003 гг.: 14 средних и поздних перестроек из 17 лет, причем определенное чередование типа перестройки также имело место. А вот второй период с 1974 по 1986 гг. отличался резким преобладанием ранних перестроек (10 случаев из 13-ти), при этом несколько лет подряд ранние перестройки отмечались непрерывно: 1974–1978 гг. и 1983–1986 гг.

В свете некоторых предыдущих работ [Атмосфера, 1991; Кац, 1968; Угрюмов, 1971] можно высказать предположение, которое, очевидно, следует учитывать в дальнейшей работе при построении моделей перестроек разного типа. Осуществление перестроек в первом и третьем периодах 46-летнего ряда следует, по-видимому, считать определенной нормой. Действительно, преобладание средних и поздних перестроек свидетельствует о ведущей роли

главных – радиационных – факторов весенней трансформации полей температуры и давления.

Именно под воздействием этих факторов, при нормальном распределении озона в стратосфере, весенняя перестройка на уровне 10 гПа должна осуществляться в первой декаде мая или немногим раньше [Угрюмов, 1971].

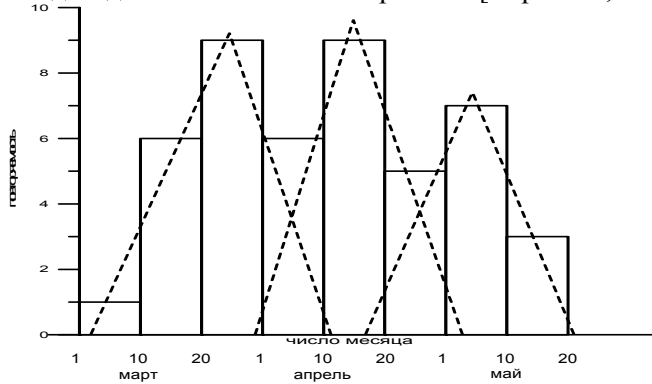


Рис. 2 Гистограмма повторяемости сроков весенней перестройки стратосферной циркуляции на уровне 10 гПа (31 км)  
 - - - - - Точечные кривые - аппроксимация трех мод гистограммы

Лишь в отдельные годы появляются дополнительные причины быстрого прогрева полярной стратосферы, которые и приводят к ранним перестройкам.

Второй период с 1974 по 1986 год – явно аномальный, «дополнительные» факторы здесь доминируют, и что к ним относится, можно установить только в результате построения физических моделей различных типов весенних перестроек стратосферной циркуляции.

### **Литература**

1. Атмосфера: Справочник. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 509 с.
2. Громова Г.Г., Князева В.И. О двухлетней цикличности в сроках формирования летнего стратосферного антициклона. // *Метеорология и гидрология*, № 6, 1964, с. 35 – 38.
3. Казакевич Д.И. Основы теории случайных функций и ее применение в Гидрометеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 319 с.
4. Кац А.Л. Циркуляция в стратосфере и мезосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 204 с.
5. Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы / Пер. с англ. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 615с.
6. Педь Д.А. Смена типов цтркуляции циркумполярного вихря в стратосфере: Труды ГМЦ вып. № 15. – Л. Гидрометеиздат, 1973, с. 26 –35
7. Педь Д.А. Сезонные условия погоды, связанные со сроками весенней смены циркуляции в стратосфере Труды ГМЦ вып. № 120. – Л.: Гидрометеиздат, 1973, с. 57 – 67.
8. Погосян Х.П. Общая циркуляция атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 394 с.
9. Пчелко И.Г. Об образовании и эволюции летнего стратосферного антициклона в северном полушарии. // *Метеорология и гидрология*, № 12, 1959, с. 3 – 9
10. Угрюмов А.И. Квазидвухлетняя цикличность весенне-летней циркуляции атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 82 с.
11. Ebdon R.A. A summer predictor. // *Weather*, vol. 21, № 7, 1966.
12. Journ. Atm. Sci., vol. 20, No 2, 1963.
13. Miers B.I. Zonal wind reversal between 30 and 80 km over the south-western United States, 1987.