

УДК 551.513

## ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ В СЕВЕРНОМ И ЮЖНОМ ПОЛУШАРИЯХ

*М.Л. Арушанов, У. Жумаев*

*Научно-исследовательский гидрометеорологический институт  
(НИГМИ), г. Ташкент  
miki-arushanov@rambler.ru*

Рассматриваются циркуляционные особенности крупномасштабного термодинамического соленида в Северном и Южном полушариях для слоя атмосферы 1000–500 гПа. Показано, что распределение климатической энергии циркуляции, как функции долготы и времени года, в Северном полушарии достаточно «гладкое» по долготе в то время как в Южном полушарии имеет волновой характер. На территории Южного полушария укладываются две волны энергии циркуляции в пропорции ~1:2.

*Ключевые слова:* циркуляция скорости, вихрь скорости, энергия циркуляции, кинетическая энергия, мощность потока.

Конец 50-х – начало 60-х годов прошлого столетия в области метеорологии отмечаются широким использованием теоремы вихря в целях прогноза динамики движения систем в свободной атмосфере, мотивированное ранее опубликованной работой Россби [8], где было установлено, что движение волнообразных циркуляционных систем в значительной мере определяется скоростью зонального ветра и параметром Кориолиса. Основы теории вихревых движений заложены в работе Гельмгольца [7], в которой показана значительная устойчивость этих движений. Вслед за Гельмгольцем, Бьеркнес, указывая на значение бароклинности в динамике атмосферных движений, доказал теорему циркуляции [6].

Применение теоремы циркуляции к прогнозу перемещения и развития систем движения в свободной атмосфере выводит рассмотрение потока воздуха в динамической метеорологии на первый план.

Все движения в атмосфере против диссипации трения поддерживаются источниками тепла и холода. Общий характер связей в вариациях напряжения и положений высотных термобарических полей с процессами циркуляции был установлен Х.П. Погосяном [4]. В частности,

им было показано, что во фронтальных зонах критерием неустойчивого равновесия потоков воздуха является градиент температуры, превышающий  $8^\circ/1000$  км. Сами по себе потоки воздуха являются более чувствительными к изменениям в соотношениях энергии или изменениям температурных контрастов, чем термобарические поля. С этой точки зрения средняя температура воздуха за определенный промежуток времени есть интегральный статистический показатель динамического теплового равновесия в процессах преобразования солнечной энергии в атмосфере и подстилающей поверхности. Задача сводится к отысканию некоторой функции  $F(T) = F\left(\frac{dT_m}{dt}, T_m\right) = \frac{dC}{dt}$ , устанавливающей связь между средней температурой воздуха  $T_m$  и процессами циркуляции.

Применим теорему ускорения циркуляции Бьеркнеса в форме

$$\frac{dC}{dt} = -R \int_S T d \ln p, \quad (1)$$

где  $R$  – газовая постоянная, к контуру  $L$  термодинамического соленоида (рис. 1), образуемого двумя разнородными потоками воздуха со средними температурами  $T_h$  и  $T_c$  ( $T_h > T_c$ ) в слое атмосферы  $P_0, P$  изобарических поверхностей.

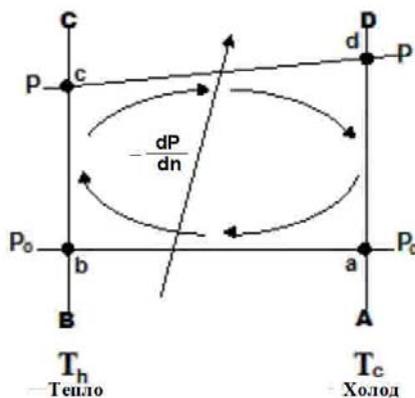


Рис. 1. Термодинамический соленоид.

Получим выражение для  $dC/dt$  по указанному замкнутому контуру. Для этого, принимая во внимание, что сумма потоков вдоль внешних границ равна циркуляции вдоль замкнутой кривой, рассмотрим сумму интегралов на отрезках  $bc$ ,  $cd$ ,  $da$ ,  $ab$ , образующихся пересечением плоскостей  $AD$  и  $CB$  уровней  $P_0$  и  $P$  (рис. 1):

$$\frac{dC}{dt} = -R \oint_L T d \ln p = -R \left[ \int_b^c T_h d \ln p + \int_c^d \frac{T_h + T_c}{2} d \ln p + \int_d^a T_c d \ln p - \int_a^b \frac{T_h + T_c}{2} d \ln p \right]. \quad (2)$$

В правой части (2) второй и четвертый интегралы взаимно уничтожаются, так как энергия не изменяется при движении по одной той же изобарической поверхности. Принимая во внимание, что  $\frac{P_b}{P_c} = \frac{P_a}{P_d} = \frac{P_o}{P}$ , окончательно, после взятия интегралов, (2) запишется в виде

$$\frac{dC}{dt} = R(T_h - T_c) \lg \frac{P_o}{P} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]. \quad (3)$$

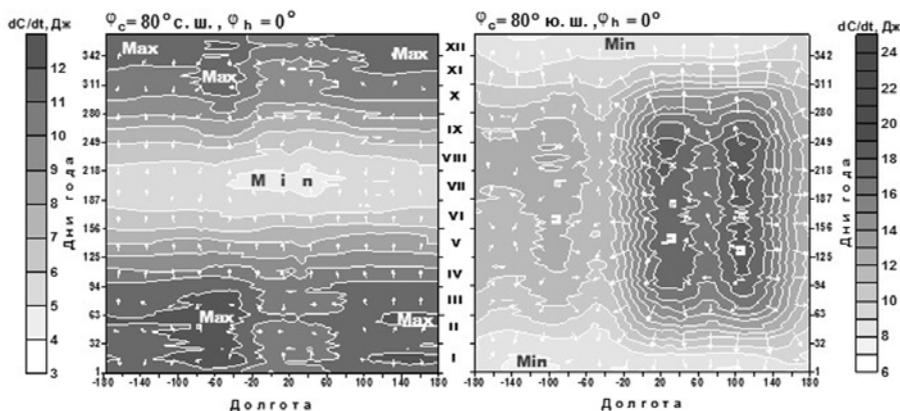
Таким образом, энергия циркуляции  $dC/dt$  является явной функцией разности температур двух разнородных потоков воздуха. Рассмотрим выражение (3) в климатологическом аспекте. Для этого были использованы данные реанализов (<http://meteolab.ru/ru/edu/linux/geanalysis/>) с шагом 2,5 градуса по долготе и широте по земному шару, представляющие средние для каждого дня года значения приземной температуры и геопотенциальных высот на уровнях 1000 и 500 гПа за период с 1981 по 2010 год.

Алгоритм расчета планетарной энергии циркуляции включает задание двух широт: «северной» и «южной» – широт «холода» и «тепла». Для заданных широтных зон рассчитывались величины  $dC/dt$  по долготе с шагом 2,5 градуса по средним для каждого дня года значениям геопотенциальных высот на уровнях 1000 и 500 гПа. Численные эксперименты выполнены для Северного и Южного полушарий на основе средней температуры слоя, рассчитанной по данным геопотенциала на соответствующих уровнях атмосферы. Сопряженные широты задавались с учетом преобладающих в климатическом аспекте воздушных потоков, обусловленных разностью температур: между экватором и полюсами, между широтами 80–65° в обоих полушариях – широтная зона пониженного давления, 65–35° – широтная зона повышенного давления, и 35–0° – широтная зона пониженного давления.

Годовой ход энергии циркуляции для выделенных широтных зон, обусловленный приходно-расходной частью кинетической энергии генерируемой работой «термодинамической машины» первого и второго рода [5], обнаруживает ряд важных различий между двумя полушариями. Наиболее ярко эти различия проявляются для годового хода энергии циркуляции, вычисленной с использованием средней температуры слоя по сопряженным широтам 80° и 0° обоих полушарий (рис. 2). Особенности этого различия в следующем.

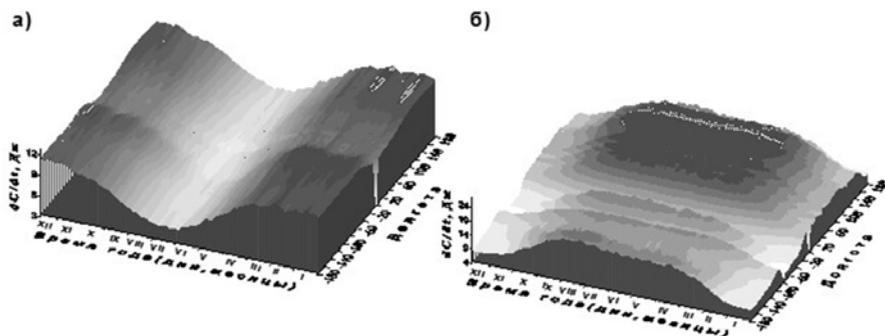
**В Северном полушарии** с апреля по октябрь климатическое распределение энергии циркуляции как функции долготы достаточно гладкое с минимумом в июле и максимумом в октябре в соответствии с минимальным контрастом температур летом и значительным – в осенний период. В холодный период (ноябрь – январь), когда контрасты

температуры в рассматриваемой широтной зоне достигают максимума, отмеченная «гладкость» энергии циркуляции, свойственная указанным месяцам года, несколько нарушается с тенденцией выделения диапазона долгот с максимальными значениями.



**Рис. 2.** Годовой ход климатической энергии циркуляции в Северном и Южном полушариях как функции долготы и времени года, рассчитанной по данным средней температуры слоя. Стрелки – градиент энергии циркуляции на соответствующей долготе данного дня года, вычисленный по восьми ближайшим узлам сетки.

**В Южном полушарии** пространственно-временное распределение энергии циркуляции противоположно таковому Северного полушария. Весьма наглядно это можно видеть, помимо рис. 2, на рис. 3, где приведены поверхности энергии циркуляции для двух сопряженных широт полюс – экватор как функции времени и долготы для обоих полушарий. Отметим, что в среднем интенсивность циркуляции в Южном полушарии в два раза больше, чем в Северном полушарии.



**Рис. 3.** Поверхность энергии циркуляции в Северном (а) и Южном (б) полушариях как функции времени и долготы.

Существенное же различие пространственно-временного распределения энергии циркуляции в обоих полушариях – это значительное различие в изменчивости  $dC/dt$  при фиксированном значении оси времени: в Северном полушарии изменчивость энергии циркуляции как функции долготы незначительна, в то время как в Южном полушарии – высокая.

На рис. 4 приведена дисперсия энергии циркуляции для обоих полушарий, рассчитанная для каждого дня года с шагом 2,5 градуса по долготе. В среднем, в Южном полушарии изменчивость  $dC/dt$  по долготе превышает аналогичную в Северном полушарии в семь раз.



**Рис. 4.** Дисперсии энергии циркуляции, рассчитанная по долготам для каждого дня года.

Другая отличительная особенность пространственно-временного распределения энергии циркуляции в Южном полушарии – наличие двух долготных зон с различной по интенсивности энергией циркуляции: от 20° з. д. на восток до 180° и от 20° з. д. на запад до 180°. Как видно из рис. 3 б, энергия циркуляции в первой долготной зоне заметно больше, чем во второй, и они разделены минимумом  $dC/dt$  с небольшим долготным диапазоном (2–4°). В свою очередь, вторая долготная зона подразделяется на три области, разделенные между собой долготными полосами 80–108° з. д. и 130–140° з. д. с минимумом  $dC/dt$ . Таким образом, в целом в Южном полушарии укладываются две волны энергии циркуляции по замкнутому кругу широты с длинами волн в пропорции с запада на восток ~1:2.

Практическое отсутствие волнообразного характера энергии циркуляции в зональном направлении в Северном полушарии – результат относительно равномерного распределения преобладающей над Южным полушарием суши (39 %).

По мере сужения задаваемых сопряженных широт различие между двумя полушариями в пространственно-временном распределении энергии циркуляции как функции долготы уменьшается (из-за экономии места рисунки не приводятся). Данная особенность объясняется уменьшением разности контрастов температур сопряженных широт в обоих полушариях при сужении в них широтных зон.

В климатологическом аспекте уравнения для кинетической энергии на единичную массу зонального ( $K_\varphi$ ) и меридионального ( $K_\lambda$ ) движений в геострофическом приближении можно записать в виде:

$$\frac{dK_\varphi}{d\varphi} = -uv \left( l + \frac{u}{a} \operatorname{tg} \varphi \right) - \frac{vg}{a} \frac{\partial H}{\partial \varphi}; \quad (4)$$

$$\frac{dK_\lambda}{d\lambda} = uv \left( l + \frac{u}{a} \operatorname{tg} \varphi \right) - \frac{ug}{a} \frac{\partial H}{\partial \lambda}; \quad (5)$$

где  $u = \frac{g}{l \cdot a} \cdot \frac{\partial H}{\partial \varphi}$ ,  $v = -\frac{g}{l \cdot a \cdot \cos \varphi} \cdot \frac{\partial H}{\partial \lambda}$  – зональная и меридиональная

составляющие ветра ( $u > 0$  при западном ветре,  $v > 0$  при северном ветре) соответственно;  $l = 2\omega \sin \varphi$  – параметр Кориолиса ( $\omega$  – угловая скорость вращения Земли);  $H$  – геопотенциальная высота;  $\varphi$  – широта,  $a$  – радиус Земли. Различие знаков у идентичных членов в (4) и (5) показывает на преобразование зональной энергии в меридиональную и наоборот.

Выполнив интегрирование по широтной зоне для рассматриваемого слоя атмосферы, получим выражение общей генерации кинетической энергии  $K_m = (u^2 + v^2) / 2$  среднего потока в слое – мощность потока, Вт:

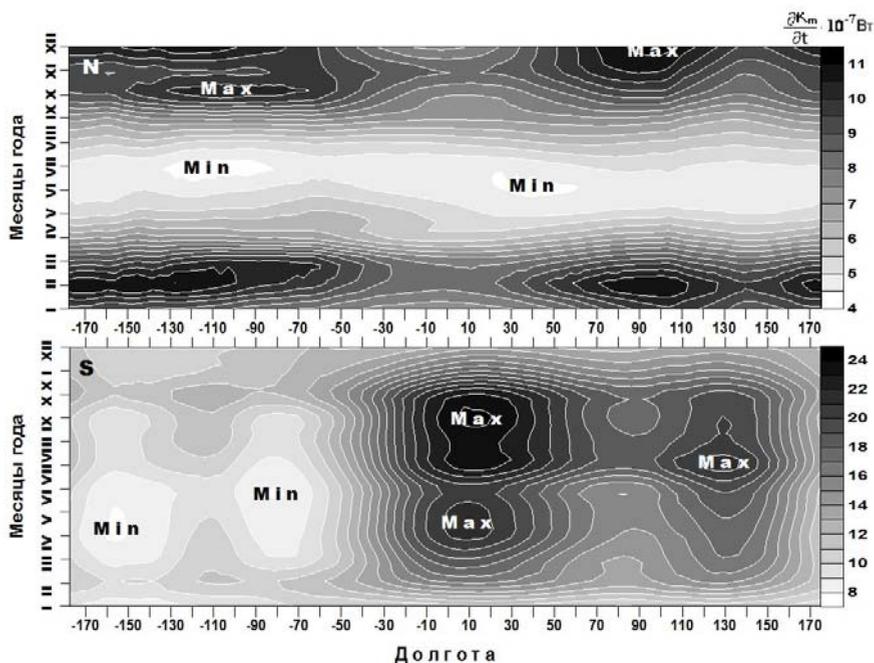
$$K_m = \frac{2\pi a}{g} \int_{P_0}^P dP \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} v \frac{\partial H}{\partial \varphi} \cos \varphi d\varphi = -2\pi \frac{\omega a^2}{g} \int_{P_0}^P dP \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} v u \sin 2\varphi d\varphi. \quad (6)$$

Вводя среднюю температуру слоя  $T_m = H_{1000}^{500} / 2,029$ , выражая  $\partial H / \partial \varphi$  через  $u$ , используя барометрическую формулу, раскрыв выражение (6), получим:

$$K_m = -\frac{3}{2} \pi \frac{\omega a^2}{10^2 \cdot g} \left[ \cos 2\varphi \cdot (1 - 2uv) + \sin 2\varphi \cdot (u + v) \right] \Bigg|_{\varphi_1}^{\varphi_2}. \quad (7)$$

Результаты расчета общей генерации кинетической энергии в двух полушариях приведены на рис. 5. Пространственно-временное распределение энергии циркуляции (рис. 2) и мощности потока (рис. 5) находятся в полном согласии, что является очевидным результатом, так как

уравнение прихода-расхода кинетической энергии получено из рассмотрения крупномасштабной циркуляционной системы, кинетическая энергия которой определена кинетической энергией горизонтальных движений.



**Рис. 5.** Генерация климатической кинетической энергии (мощность потока) в слое 1000–500 гПа в Северном (N) и Южном (S) полушариях, рассчитанная по среднемесячным данным геопотенциала на соответствующих уровнях.

### Заключение

Вопросы общей циркуляции атмосферы имеют давнюю историю (Хэдли, Дове, Мори, Феррел, Бьеркнес, Бергерон и др.), на первом этапе носящие умозрительный характер, а позже основанные на анализе уравнений динамики, не нашли полного ответа до настоящего времени. Необходимым (явное не противоречие законам физики и согласование хотя бы в общих чертах с натурными наблюдениями), но не достаточным условием тех или иных схем общей циркуляции атмосферы на основе уравнений динамики является их не противоречие соотношениям баланса [1]. Всем схемам общей циркуляции атмосферы, имеющим давнюю историю, свойственно наличие зональной симметрии относительно экватора с областями, разделенные тропиком Рака в Северном полушарии и Козерога – в Южном. В [1] одной из групп классификации характерной для процессов общей циркуляции атмосферы

Э. Лоренц выделяет «свойства, которые проявляются с наибольшей полнотой, когда переменные усреднены по времени и долготе». Однако, как показали результаты, полученные в данной работе, изменчивость по долготам и пространственная ориентация энергии циркуляции как функции времени в слое 1000–500 гПа в Южном полушарии сильно отлична от таковой Северного полушария, что противоречит общепринятой картине ее зональной симметрии относительно экватора.

*Поступила в редакцию 12.09.2017 г.*

#### Список использованных источников

1. Лоренц Э.Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 258 с.
2. Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 398 с.
3. Петерсен С. Анализ и прогноз погоды. Л.: Гидрометеоздат, 1961. 652с.
4. Погосян Х.П. Общая циркуляция атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1972. 393 с.
5. Шулейкин В.В. Строение поля тропического урагана // Доклады АН СССР. 1976. Т. 186, № 3. С. 578-582.
6. Bjerknes V. Über die Bildung von Circulationsbewegungen und Wirbeln in reibungslosen Flüssigkeiten // Skr. Nor. Vidensk. Akad. Kl. I: Mat.– Naturvidensk. 1898. P. 1-29.
7. Helmholtz H. Über Integral der hydrodynamischen Gleichungen Welch den Wirbelbewegungen entsprechen // J. Reine Angew. Math. 1867. Vol. 55. P. 25-55.
8. Rossby C.G. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semipermanent centers of action // J. Marine Res. 1939. Vol. 2. P. 38-55

#### SUMMARIES

**Specific features of the spacial-temporal distribution of the atmosphere circulation climatic energy in the Northern and Southern hemispheres / Arushanov M.L., Zhumaev U. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. 2017. Vol. 366. P. 137-144.**

Circulation features of a large-scale thermodynamic solenoid in the northern and southern hemispheres for the atmosphere layer 1000-500 hPa are considered. It is shown that the distribution of the climatic circulation energy, as a function of longitude and time, in the northern hemisphere is sufficiently «smooth» in longitude, while in the southern hemisphere, has a wave character. In the southern hemisphere two circulating energy waves are laid in the proportion of ~1:2.

*Keywords:* velocity circulation, velocity vortex, circulation energy, kinetic energy, flow power.