

УДК 551.582.2

DOI: 10.17072/2079-7877-2021-2-96-109

АНАЛИЗ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ВОЗДУХА НАД АТЛАНТИКО-ЕВРОПЕЙСКИМ СЕКТОРОМ

Леонид Мусамудинович АкимовORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0749-1976>, Scopus Author ID: 57194133439,

SPIN-код: 2546-3768, Author ID: 256182

e-mail: akl63@bk.ru, root@geogr.vsu.ru*Воронежский государственный университет «ВГУ», г. Воронеж, Россия*

На основании вычисленных лапласианов геопотенциала 1000 гПа исследованы особенности пространственного и временного распределения полей вертикальных токов у поверхности земли в Северном полушарии, над Атлантико-Европейским сектором, ограниченном долготами 90,0° з.д. – 90,0° в.д., в различные сезоны года и выявлена их временная динамика. Отмечена большая временная устойчивость пространственного положения элементов вертикального движения воздуха. Наблюдается сохранение их направленности в различные сезоны года, с незначительным изменением интенсивности потока во времени. Выявлено, что интенсивность вертикальных потоков в высоких широтах в 1,5–2,0 раза больше, чем в низких широтах.

Ключевые слова: общая циркуляция, лапласиан, геопотенциал, вертикальные движения воздуха, интенсивность потока, Первый естественный синоптический район, часть экваториальной зоны Северного полушария, Третий естественный синоптический район.

ANALYSIS OF VERTICAL MOVEMENTS OF AIR OVER THE ATLANTIC-EUROPEAN SECTOR

Leonid M. AkimovORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0749-1976>, Scopus Author ID: 57194133439,

SPIN-code: 2546-3768, Author ID: 256182

e-mail: akl63@bk.ru, root@geogr.vsu.ru*Voronezh State University "VSU", Voronezh, Russia*

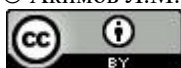
On the basis of the calculated Laplacians of the geopotential 1000hPa, the features of the spatial and temporal distribution of vertical current fields at the surface of the earth in the northern hemisphere over the Atlantic-European sector, limited by longitudes of 90° w.l. – 90° e.l., in different seasons of the year and revealed their temporal dynamics. Greater temporal stability of the spatial position of the elements of vertical air movement is noted. Their directionality remains unchanged in different seasons of the year, with a slight change in flow intensity over time. It was revealed that the intensity of vertical streams in high latitudes is 1,5–2 times higher than in low latitudes.

Keywords: general circulation, vertical air movements, ascending flows, descending flows, intensity of air movements.

Введение

Вертикальные движения атмосферного воздуха – важнейший элемент общей циркуляции атмосферы. В зависимости от природы формирования и масштабов образования вертикальные потоки в атмосфере делятся на пять типов: 1) неупорядоченные, связанные с турбулентностью; 2) упорядоченные вертикальные движения, связанные с конвекцией, местными вихрями и циркуляционными системами; 3) волновые движения различного происхождения; 4) местные орографические явления; 5) упорядоченные вертикальные движения, обусловленные приземным трением и нестационарностью крупномасштабных воздушных течений [26].

© Акимов Л.М., 2021



Интенсивность вертикальных движений воздуха наряду с температурным режимом и влагосодержанием является основной термодинамической характеристикой воздушных масс, что позволяет классифицировать их как устойчивые и неустойчивые. Изменение термических характеристик воздушных масс, в зависимости от направления движения воздуха, позволяет рассматривать их в качестве глобального фактора терморегуляции атмосферы. Неупорядоченные вертикальные движения, являющиеся основным элементом турбулентности атмосферы, способствуют выравниванию глобального поля температуры. Восходящие движения воздуха способствуют охлаждению атмосферы, а нисходящие движения – ее нагреву. Среди большого количества работ, посвящённых исследованию турбулентности атмосферы, следует выделить труды Дж.А. Бусингера [9], Н.Л. Бызовой [10], Г.В. Груза [17], Л.Т. Матвеева [33–35], А.С. Моница [36] и др.

Вертикальные движения воздуха в атмосфере, в большей части, формируются за счет их взаимодействия с подстилающей поверхностью. Зависимость плотности воздуха от температуры, согласно положениям первого закона термодинамики, имеет обратно-пропорциональную зависимость, т.е. чем больше температура воздуха, тем меньше ее плотность. Меньшая плотность воздуха с большей температурой обуславливает усиление силы плавучести, которая способствует вертикальным движениям воздуха. Следует отметить, что вертикальные движения воздуха, образованные вследствие неравномерного нагревания воздуха от подстилающей поверхности, называются термической конвекцией.

Изучение условий возникновения термической конвекции и формирования осадков является наиболее распространенным направлением исследования вертикальных движений воздуха. На основании характера и интенсивности вертикальных движений воздуха разрабатываются различные физико-статистические методы прогноза облаков конвективного развития, грозовой деятельности и выпадения ливневых осадков, представляющих опасность для деятельности авиации (Л.М. Акимов и др. [3], Н.Ф. Вельтищев и др. [12; 13], В.И. Воробьев [14], А.С. Зверев [26; 27], Л.Т. Матвеев [33–35]). Следует отметить и региональный аспект изучения вертикальных токов. Проводимые исследователями Пермского края (Н.А. Калинин [28], С.В. Костарев [31], Н.И. Толмачева, Л.Н. Ермакова [42; 43]) работы по изучению кучево-дождевых облаков и опасных явлений, связанных с ними (ливневые осадки, грозы, град, шквал), взаимозависимы от вертикальных движений воздуха.

Волновые вертикальные движения воздуха возникают в слоях инверсии и изотермии вследствие разности плотности и скорости движения воздуха. При этом в вершинах волн имеют место восходящие движения, а в долинах – нисходящие. Исследование влияния волновых вертикальных движений воздуха на условия накопления или рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере отражено в работах К.Г. Абрамовича [1], Л.М. Акимова [2], А.Е. Алояна [4], Л.Р. Арраго [5], М.Е. Берлянда [8], Дж.А. Бусингера [9], Н.Ш. Гусейнова [18].

Первенство исследования вертикальных движений атмосферы, обусловленных влиянием орографических препятствий, принадлежит И.А. Кибелю [29]. Анализу влияния горных хребтов на перемещение циклонов посвящены работы Н.В. Петренко [37], М.А. Петросянца [38, 40], В.Н. Кожевникова [30], Г.В. Груза и др. [16].

М.Ю. Бардин занимался исследованием вертикальных движений атмосферы в Атлантическом секторе умеренных широт и их влиянию на изменение характеристик циклоничности [7].

Изучение циркуляционных процессов в тропической зоне проводилось учеными МГУ М.А. Петросянцем, Д.Ю. Гушиной, С.Г. Лакеевым, Е.К. Семеновым, Н.Н. Соколихиной [39–40]. Особо следует выделить направление работ

Д.Ю. Гушиной [19–21; 25], в которых проводились исследования вертикальных движений в тропических и умеренных широтах при развитии явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

Среди исследователей крупномасштабных вертикальных движений тропической зоны в зависимости от погодных условий следует выделить труды Zachary J. Handlos и Larissa E. Back [44–46], которые установили, что максимальное вертикальное движение вверх происходит в нижней тропосфере, а не в средней и верхней тропосферах.

Исходя из вышесказанного, следует, что исследование вертикальных движений воздуха, определение их пространственно-временных особенностей является актуальной задачей.

Цель данного исследования – изучение особенностей пространственного и временного распределений полей вертикальных токов у поверхности земли в различные сезоны года.

Методика исследования

Интенсивность и направленность вертикальных движений воздуха определяют характер барического поля, который, в свою очередь, определяет циркуляционный и термический режимы территории. Таким образом, вертикальные движения воздуха являются важным климатообразующим параметром атмосферы.

Изучению данного направления исследования посвящены работы Н.А. Багрова [6], В.И. Воробьева [14], А.А. Гирса [15], Г.В. Груза [16–17], Б.Л. Дзердзеевского [23], А.Ф. Дюбюка [24], В.Н. Малинина [32], А.С. Моница [36]. В рассмотренных трудах вертикальная скорость на границе пограничного слоя вычисляется различными методами: по уравнению неразрывности (интегрирование уравнения неразрывности в изобарической системе координат), по уравнению притока тепла в адиабатическом приближении, из системы полных уравнений гидротермодинамики в геострофическом приближении, путем совместного решения уравнения неразрывности и вихря скорости. Все перечисленные методы имеют довольно сложный математический аппарат.

Следует отметить, что вертикальные движения воздуха не измеряются непосредственно, а рассчитываются на основе их связей с полями давления, ветра и температуры. Наибольшее применение получил метод, основанный на совместном использовании вертикальной составляющей вихря скорости и неразрывности, с учётом вклада дивергенции воздушных течений, предложенный А.Ф. Дюбюком, Н.И. Булеевым, М.И. Юдиным [24].

На основании данного подхода Н.В. Лебедевой разработана формула для определения вертикальных движений воздуха в пограничном слое атмосферы, имеющая следующий вид [22]:

$$w_h = -3,5\overline{\nabla^2 H_0}, \quad (1)$$

где w_h – вертикальные движения в пограничном слое атмосферы, $\overline{\nabla^2 H_0}$ – среднее арифметическое значение лапласиана геопотенциала поверхности 1000 гПа, рассчитанное с помощью прямоугольной сетки с шагом 500 км.

Выбор лапласиана геопотенциала (давления) $\Delta^2 H_0$ в качестве основного параметра обусловлен тем, что лапласиан количественно характеризует значение вертикальной составляющей вихря скорости [6; 14; 22; 26].

Определение вертикальной составляющей вихря скорости с помощью лапласиана для поля геопотенциальных высот изобарической поверхности выполняется по уравнению

$$\nabla^2 H_{ij} = \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \Delta. \quad (2)$$

Получаем явные выражения дифференциальных операций второго порядка:

$$\Delta^2 H_{ij} = \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \overline{\nabla} \cdot \overline{\nabla} H = \text{div grad} H_{ij}. \quad (3)$$

Из выражения 3 следует, что дивергенция градиента давления (геопотенциала) является его лапласианом $div\mathbf{grad}H = \Delta^2 H$ [9; 22] и пропорциональна среднему «градиенту» (интенсивности изменения давления вдоль радиус-вектора) в рассматриваемой области, ограниченной окружностью с радиусом r .

При расходимости вектора скорости, когда наблюдается положительная дивергенция $D > 0$, происходит отток воздуха от данной точки, наблюдаются положительные значения лапласиана $\Delta^2 H > 0$, количественно определяющие границы циклонических вихрей и связанные с ними ложбины. При отрицательной дивергенции (конвергенция) $D < 0$ (значения лапласиана $\Delta^2 H < 0$), в случае расходимости вектора скорости, наблюдается приток воздуха в данной точке пространства, отмечается антициклон или гребень.

Следовательно, дивергенция представляет собой относительное изменение объема, занимаемого единичной массой воздуха, за единицу времени [22]. С дивергенцией действительного ветра связаны приток и отток воздуха в данной точке пространства [22–33]. Таким образом, значение оператора Лапласа в точке является плотностью потоков (стоков) потенциального векторного поля в этой точке [11; 26; 33].

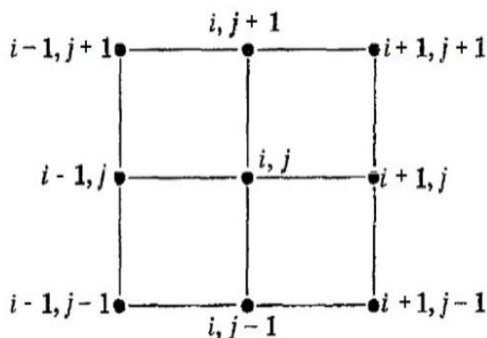


Рис. 1. Схема прямоугольной квадратной (шахматной) 9-точечной расчетной сетки [32]

Fig. 1. Scheme of a rectangular square (chess) 9-point computational grid [32]

Для вычисления производных оператора Лапласа $\frac{\partial^2 H}{\partial x^2}$ и $\frac{\partial^2 H}{\partial y^2}$ на практике используется 5-точечная или 9-точечная прямоугольная сетка вокруг каждого заданного узла с шагом s . При этом 9-точечная конечно-разностная аппроксимация имеет большую точность [26]. А начало координат совпадает с тем узлом широтно-долготной сетки, в которой производится расчет. Схема прямоугольной расчетной 9-точечной сетки представлена на рис. 1.

Вычисление производных в точке 0 осуществляют по методу наименьших квадратов, рассчитывая конечно-разностные выражения с использованием прямоугольной квадратной (шахматной) 9-точечной расчетной сетки [32]. Перемещая начало координат из точки 0 в любую точку расчетной сетки и принимая эту точку за новое начало координат, можно вычислить производные для всех интересующих нас точек исследуемой территории.

Расчетная формула оператора Лапласа при использовании аппроксимации производных с помощью центральных разностей для квадратной (шахматной) сетки, состоящей из 9 точек поля геопотенциальных высот изобарической поверхности 1000 гПа, определяется формулой [22; 26; 32]:

$$\nabla^2 L_{ijx} = \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \frac{H_{i+1,j+1} + H_{i+1,j-1} - 2H_{i+1,j} + 2(H_{i,j+1} + H_{i,j-1} - 2H_{i,j}) + H_{i-1,j+1} + H_{i-1,j-1} - 2H_{i-1,j}}{4(\delta s_x) \cos \varphi}, \quad (4)$$

$$\nabla^2 L_{ijy} = \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \frac{H_{i+1,j+1} + H_{i-1,j+1} - 2H_{i,j+1} + 2(H_{i+1,j} + H_{i-1,j} - 2H_{i,j}) + H_{i+1,j-1} + H_{i-1,j-1} - 2H_{i,j-1}}{4(\delta s_y)}, \quad (5)$$

где L_{ij} – значение лапласиана в заданном узле поля, H_{ij} – значения геопотенциала в точках расчетной сетки, H_0 – значения геопотенциала в центре квадрата, δs_x и δs_y – шаг регулярной сетки по долготе и широте. Согласно методике вычисления метеорологических величин, шаг сетки δs принят равным 500 км [22]. Соответственно единица измерения лапласиана гПа/500 км².

Информационной базой служили данные реанализа ERA-40, Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды [47] ежедневных значений геопотенциальных высот i на

Метеорология

Акимов Л.М.

поверхности 1000 гПа, представленные в виде $H_{i,t,j,\varphi,\lambda}^{1000}$, в узлах регулярной сетки (φ ; λ) северного полушария с шагом $\Delta\varphi=2,5^\circ$ по широте и $\Delta\lambda=2,5^\circ$ по долготе, в широтной зоне φ от $0,0^\circ$ с.ш. до $90,0^\circ$ с.ш., в секторе λ от $90,0^\circ$ з.д. до $90,0^\circ$ в.д., для всех календарных месяцев t , за период наблюдений j с 1948 по 2018 г.

Исследуемый сектор охватывает несколько разных географических районов (φ ; λ) от $90,0^\circ$ з.д. до $90,0^\circ$ в.д., выделенных по долготе, и от экватора до северного полюса – по широте. В область исследования входит Первый естественный синоптический район, включающий Северную Атлантику и часть Евразии, на которую распространяется влияние Атлантики, экваториальная зона Северного полушария и часть Третьего естественного синоптического района.

По результатам расчета ежедневных значений лапласиана были вычислены среднемесячные значения лапласианов, обобщенные за 1948–2018 гг. в каждом конкретном узле (φ ; λ). В связи с тем, что использовались фактические, а не прогностические значения геопотенциала, исследование носит диагностический характер.

Обсуждение результатов

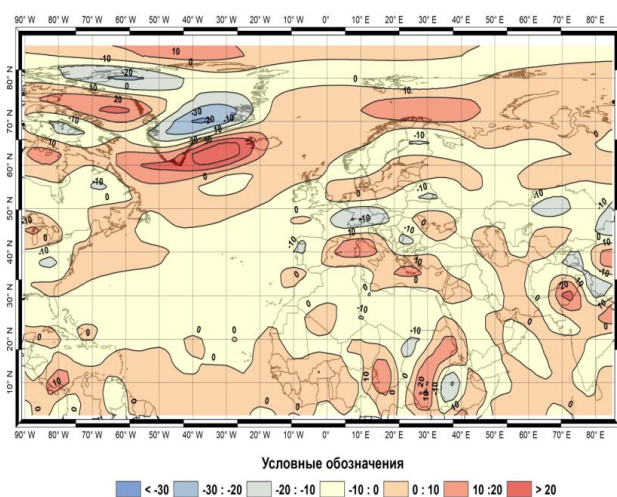


Рис. 2. Распределение лапласиана на АТ–1000 гПа в январе
Fig. 2. The Laplacian distribution at АТ–1000 hPa in January

Результаты вычислений лапласиана геопотенциальных высот $\nabla^2[H_{t,j,\varphi,\lambda}^\gamma]$ для января на изобарической поверхности АТ-1000 гПа, в различных широтных зонах, представлены на рис. 2.

Из анализа рисунка видно, что в январе поле значений лапласианов в рассматриваемой области северного полушария имеет квазизональную структуру чередования по широтам положительных и отрицательных значений, характеризующих чередование широтных зон с восходящими и нисходящими движениями воздуха, которые, в

свою очередь, указывают на расположение барических образований (циклонов и антициклонов) на рассматриваемой территории. Нарушение широтной зональности распределения вертикальных токов обусловлено воздействием подстилающей поверхности.

Районы северного полюса, в полосе широт от $90,0^\circ$ с.ш. до $85,0^\circ$ с.ш., находятся под влиянием восходящих движений воздуха и могут указывать на среднее положение центра циркуляции в рассматриваемом секторе северного полушария. Очаг максимума восходящих движений со значениями лапласиана давления более $10 \text{ гПа}/500 \text{ км}^2$ расположен в секторе от $60,0^\circ$ з.д. до $30,0^\circ$ з.д., на широтах от $87,5^\circ$ с.ш. до $90,0^\circ$ с.ш.

Далее к югу располагается узкая полоса нисходящих движений воздуха, шириной около 750 км, вытянутая вдоль всего широтного круга от $82,5^\circ$ с.ш. до $77,5^\circ$ с.ш.

В районе о. Гренландия наблюдается мощный очаг нисходящих движений воздуха со значениями лапласиана более $-30,0 \text{ гПа}/500 \text{ км}^2$, охватывающий широтную зону от $82,5^\circ$ с.ш. до $60,0^\circ$ с.ш. и сектор от $50,0^\circ$ з.д. до $20,0^\circ$ з.д.

Между широтами от $82,5^\circ$ с.ш. до $57,5^\circ$ с.ш. располагается обширная область восходящих движений воздуха, объясняемая нахождением здесь теплых океанических

течений (Гольфстрима и Северо-Атлантического), повторяющая конфигурацию направления их осей и имеющая вдоль них максимальные величины лапласиана. Очаг наиболее интенсивного потока восходящих движений воздуха (более 40 гПа/500 км²), расположенный в районе м. Фарвель на южной оконечности о. Гренландия и в районе о. Исландия на широте 60,0° с.ш. в секторе от 30,0° з.д. до 40,0° з.д., обусловлен Северо-Атлантическим течением.

В широтной зоне от 55,5° с.ш. до 17,5° с.ш., от Мексиканского залива – Саргассово море – Пиренейский п-ов – и далее, параллельно 50,0° с.ш., расположена область умеренного по интенсивности нисходящего потока воздуха (от 4,0 гПа/500 км² до 10,0 гПа/500 км²), совпадающая с положением «оси Воейкова» [41].

Максимальные значения нисходящих движений воздуха в рассматриваемой территории наблюдаются на восточной границе (от 80,0° в.д. до 90,0° в.д.), обусловлены влиянием Сибирского антициклона и превышают уровень лапласиана $\Delta p > -10$ гПа/500 км².

Над континентальной частью территории наблюдаются еще два очага интенсивного нисходящего потока воздуха со значением лапласиана давления $\Delta p > -10$ гПа/500 км², расположенные в секторах от 60,0° в.д. до 70,0° в.д. и от 5,0° в.д. до 20,0° в.д.

В экваториальной зоне, охваченной широтами φ от 0,0° с.ш. до 15,0° с.ш., наблюдается полоса умеренно восходящего потока воздуха со значениями лапласиана, находящимися в пределах от 5 до 10 гПа/500 км² с максимумом 22 гПа/500 км², располагающимся на востоке Африки в районе 30,0° в.д.

С целью выявления общих закономерностей распределения вертикальных токов вдоль широт проведено осреднение значений лапласиана на фиксированных широтах по всем долготам рассматриваемого сектора. Полученные результаты осредненных значений лапласиана по широтам для января представлены на рис. 3.

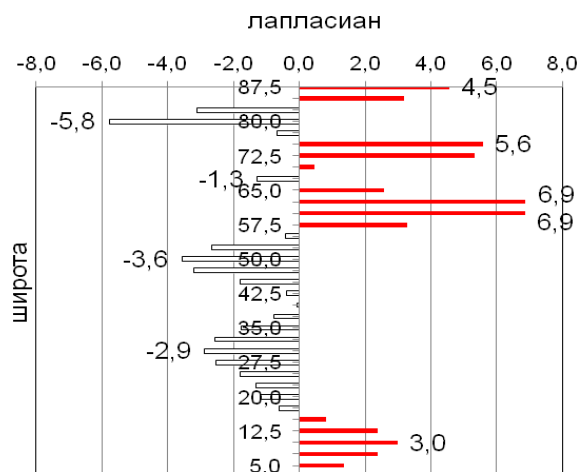


Рис. 3. Осредненные по широтам лапласианы, январь, 1948–2018 гг.

Fig. 3. Laplacians averaged over latitudes, January, 1948–2018

Из анализа рисунка видно, что от экватора до широты $\varphi=17,0^\circ$ с.ш. расположена полоса восходящих движений средней интенсивности. Наиболее интенсивные восходящие движения воздуха в этом поясе наблюдаются на широте 10,0° с.ш. со значением лапласиана давления 3 гПа/500 км².

Далее на север, в широтной зоне от 17,5° с.ш. до 55,0° с.ш., расположена обширная полоса нисходящего движения воздуха умеренной интенсивности, имеющая два максимума. Один максимум нисходящего потока воздуха наблюдается на широте 30,0° с.ш. со значением лапласиана $\Delta p = -2,9$ гПа/500 км² и другой максимум расположен на широте 50,0° с.ш. ($\Delta p = -3,6$ гПа/500 км²). При этом на широте 40,0° с.ш. интенсивность вертикального тока воздуха близка к нулю. Широту 40,0° с.ш. следует считать в данном случае демаркационной линией двух нисходящих потоков.

В широтной зоне, от 57,5° с.ш. до 75,0° с.ш., наблюдается интенсивный подъем воздуха, по интенсивности более чем в два раза превышающий восходящие движения воздуха южных широт. Наибольший подъем воздуха, со значениями лапласиана 6,9 гПа/500 км², отмечается в широтной зоне от 60,0° с.ш. до 62,5° с.ш. Также интенсивный восходящий

Метеорология

Акимов Л.М.

поток наблюдается на широтах φ от $72,5^\circ$ с.ш. до $75,0^\circ$ с.ш. ($\Delta p = 5,6$ гПа/500 км²). Широта $67,5^\circ$ с.ш. является разделом этих мощных восходящих потоков. На этой широте выражена узкая полоса нисходящего потока с интенсивностью лапласиана $\Delta p = -1,3$ гПа/500 км².

Между широтами от $77,5^\circ$ с.ш. до $82,5^\circ$ с.ш. расположена зона значительных нисходящих потоков воздуха, достигающих наибольшей интенсивности на широте $80,0^\circ$ с.ш., со значением лапласиана $\Delta p = -5,8$ гПа/500 км².

От широты $\varphi = 85,0^\circ$ с.ш. до полюса включительно наблюдаются восходящие движения воздуха с интенсивностью, превышающей южные широты. Максимальное значение лапласиана $\Delta p = 4,5$ гПа/500 км² наблюдается на широте $87,5^\circ$ с.ш.

Для выявления климатических тенденций вертикальных токов за различные временные периоды проведен сравнительный анализ средних значений лапласиана за два различных периода: с 1948 по 1977 г. и с 1989 по 2018 г. Временные интервалы выбраны с учетом индекса глобальных аномалий температуры над континентами и мировым океаном [48]. В период с 1948 по 1977 г. общий фон глобальной температуры был относительно отрицательным, но в целом за этот период составлял минус $0,10$ °С, а в период с 1989 по 2018 г. – положительным ($0,75$ °С). Проведенное исследование позволило установить сохранение во времени положения границ вертикальных потоков, но наблюдалось изменение их интенсивности.

Анализ климатической разности лапласиана за два разных периода с 1948–1977 гг. и 1989–2018 гг., представленный в табл. 1, позволил установить общую тенденцию усиления восходящих движений в южных и умеренных широтах. Данная тенденция объясняется тем, что восходящие потоки усиливаются, а нисходящие – ослабевают. В полярных широтах, наоборот, наблюдается усиление антициклональной циркуляции с усилением нисходящих потоков.

Таблица 1

Климатическая разность лапласиана с 1948–1977 гг. и 1989–2018 гг. в январе
Climate difference of the Laplacian in 1948–1977 and 1989–2018 in January

С.ш.	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0
Разница	0,6	0,9	0,4	-0,3	-0,7	-0,9	-0,3	0,7	0,9	0,2	-0,4	0,1
С.ш.	32,5	35,0	37,5	40,0	42,5	45,0	47,5	50,0	52,5	55,0	57,5	60,0
Разница	0,7	-0,4	-2,1	-2,3	-0,8	0,4	0,0	-1,1	-0,9	0,5	1,6	1,8
С.ш.	62,5	65,0	67,5	70,0	72,5	75,0	77,5	80,0	82,5	85,0	87,5	–
Разница	1,2	0,2	-0,8	-1,3	-0,7	0,6	1,6	1,5	0,6	0,0	-0,2	–

Результаты анализа разности лапласиана за два различных временных периода в январе, представленные в табл. 1, свидетельствуют об усилении восходящих потоков на широте $5,0^\circ$ с.ш. до $0,9$ гПа/500 км² и об ослаблении нисходящих потоков на широте $15,0^\circ$ с.ш. до $-0,9$ гПа/500 км². На широте $22,5^\circ$ с.ш. наблюдается усиление нисходящих потоков до $0,9$ гПа/500 км². Наибольшее ослабление нисходящих потоков до $-2,3$ гПа/500 км² отмечается на широте $40,0^\circ$ с.ш. Зона ослабления нисходящих потоков охватывает территорию от $35,0^\circ$ с.ш. до $52,5^\circ$ с.ш. с отрицательными значениями лапласиана от $-0,4$ гПа/500 км² до $-0,9$ гПа/500 км² соответственно.

В широтной зоне от $55,0^\circ$ с.ш. до $65,0^\circ$ с.ш. установлено существенное усиление восходящих движений до $1,8$ гПа/500 км² на широте $60,0^\circ$ с.ш.

В полярных широтах, от $67,5^\circ$ с.ш. до полюса, наблюдается усиление антициклональной циркуляции. В широтной зоне от $67,5^\circ$ с.ш. до $72,5^\circ$ с.ш. отмечается ослабление восходящих потоков до минимального значения лапласиана $-1,3$ гПа/500 км² на

Метеорология
Акимов Л.М.

широте $70,0^\circ$ с.ш. В полосе широт от $75,0^\circ$ с.ш. до $85,0^\circ$ с.ш., наоборот, наблюдается усиление нисходящих потоков до значений лапласиана $1,5-1,6$ гПа/500 км² на широтах от $77,5^\circ$ с.ш. до $80,0^\circ$ с.ш.

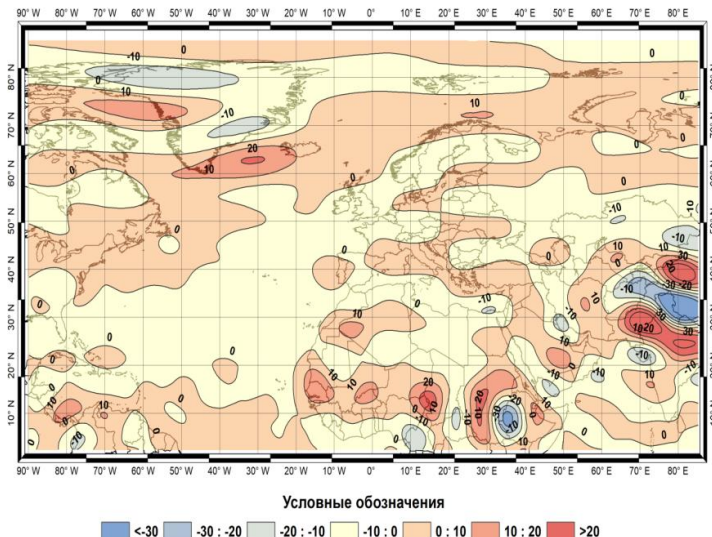


Рис. 4. Распределение лапласиана на АТ-1000 гПа в апреле
Fig. 4. The Laplacian distribution at АТ-1000 hPa in April

формированием Южно-Азиатской депрессии. Другой очаг расположен в предгорьях Гималаев, в секторе λ от $65,0^\circ$ в.д. до $87,5^\circ$ в.д. на широте $25,0^\circ$ с.ш. ($\Delta p = 22,3$ гПа/500 км²) и обусловлен влиянием муссонного типа климата в этом районе.

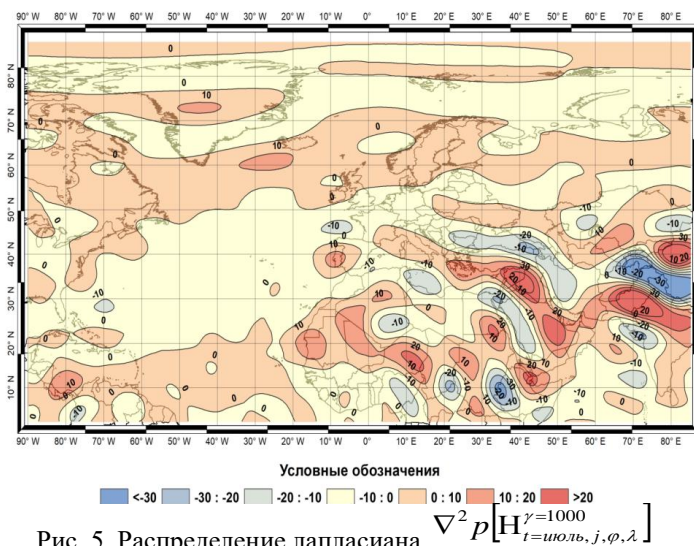


Рис. 5. Распределение лапласиана на АТ-1000 гПа, июль
Fig. 5. The Laplacian distribution at АТ-1000 hPa, July

тенденция уменьшения интенсивности вертикальных потоков, особенно в высоких широтах, летом сохраняется. В высоких широтах наблюдается значительное расширение площади нисходящих движений воздуха средней интенсивности ($\Delta p < 10,0$ гПа/500 км²). Полоса нисходящих движений воздуха простирается от полюса до широты $\phi = 77,5^\circ$ с.ш.

В районе о. Гренландия, на месте очага нисходящих движений воздуха, формируется обширная зона восходящих потоков средней интенсивности ($\Delta p = 11,4$ гПа/500 км²).

Весной (рис. 4) общая картина распределения вертикальных токов в северном полушарии сохраняется, но, судя по значениям лапласианов, на всей рассматриваемой части северного полушария интенсивность вертикальных движений воздуха весной меньше, чем зимой.

На юго-востоке территории (рис. 4) наблюдается формирование двух интенсивных очагов восходящих движений воздуха. Один находится в секторе долгот λ от $80,0^\circ$ в.д. до $87,5^\circ$ в.д. и широте $40,0^\circ$ с.ш., в районе Монголии, со значением лапласиана $18,5$ гПа/500 км² и характеризуется

Очаг нисходящих движений воздуха расположен между ними, над вершинами Гималаев. Область нисходящих движений воздуха формирует промежуточный антициклон, с центром в районе $\phi = 30,0^\circ$ с.ш. и $\lambda = 80,0^\circ$ в.д., со значением лапласиана $\Delta p = -12,6$ гПа/500 км².

Летом (рис. 5) общая конфигурация поля вертикальных токов по отношению к зимнему и весеннему периодам практически не изменилась. Наблюдаются незначительные смещения границ зон восходящих и нисходящих движений по широтам.

Из рис. 5 следует, что намечившаяся в весенний период

Метеорология

Акимов Л.М.

Второй очаг восходящих движений воздуха аналогичной интенсивности наблюдается в районе Исландии, что подтверждает статус Исландской депрессии в качестве постоянного центра действия атмосферы.

Полоса вертикального подъема воздуха вытягивается узкой полосой шириной 500–1000 км, от Саргассова моря на Скандинавский п-ов и далее – вдоль широт φ от $65,0^\circ$ с.ш. до $60,0^\circ$ с.ш.

Вдоль умеренных широт φ (от $60,0^\circ$ с.ш. до $30,0^\circ$ с.ш.) наблюдаются нисходящие потоки слабой ($\Delta p < -5,0$ гПа/500 км²) и местами умеренной ($\Delta p < -10,0$ гПа/500 км²) интенсивности. Единственный мощный нисходящий поток воздуха, со значениями лапласиана в центре $\Delta p = -23,4$ гПа/500 км², наблюдается в районе Казахстана и части Монголии. Поле нисходящих потоков не сплошное, а с отдельными разрывами, в виде полей с восходящими потоками.

Для детализации распределения полей лапласиана по долготам в полосе умеренных широт φ (от $60,0^\circ$ с.ш. до $30,0^\circ$ с.ш.) рассчитаны средние по всем широтам долготные значения лапласиана. В табл. 2 представлены результаты расчета лапласиана для сухопутной части рассматриваемой территории, ограниченной сектором λ от $0,0^\circ$ в.д. до $87,5^\circ$ в.д. Жирным цветом выделены секторы с положительными значениями лапласиана Δp более $3,0$ гПа/500 км².

Таблица 2

Осредненные по долготам значения лапласиана в июле
Longitude averaged values of the Laplacian in July

Долгота	0,0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5
Лапласиан	-1,9	-1,3	-0,6	-0,3	-0,2	-0,2	0,0	0,3	0,1	-0,6	-1,4	-1,7
Долгота	30,0	32,5	35,0	37,5	40,0	42,5	45,0	47,5	50,0	52,5	55,0	57,5
Лапласиан	-1,1	0,2	0,9	0,3	-1,8	-4,0	-4,8	-3,7	-1,7	-0,2	0,0	-0,1
Долгота	60,0	62,5	65,0	67,5	70,0	72,5	75,0	77,5	80,0	82,5	85,0	87,5
Лапласиан	0,3	1,1	0,8	-1,3	-4,0	-4,8	-2,0	3,0	6,8	7,0	4,3	3,6

Из табл. 2 видно, что общий фон вертикальных движений воздуха в июле в основном отрицательный, что свидетельствует о преобладании антициклонального типа погоды в умеренных широтах над Европейской территорией. Интенсивность вертикальных потоков незначительная, в основном не превышает $\Delta p < -2,0$ гПа/500 км² и только в секторе λ от $42,5^\circ$ в.д. до $47,5^\circ$ в.д. наблюдается умеренный очаг нисходящих движений воздуха со среднеширотными значениями лапласиана от $\Delta p = -3,7$ гПа/500 км² до $-4,8$ гПа/500 км². Еще один небольшой очаг нисходящих движений воздуха отмечается в секторе λ от $70,0^\circ$ в.д. до $72,5^\circ$ в.д., его среднеширотное значение лапласиана достигает $-20,0$ гПа/500 км². На восточной границе территории (от $77,5^\circ$ в.д. до $87,5^\circ$ в.д.) установлено интенсивный очаг восходящих движений со среднеширотными значениями лапласиана давления $6,8$ – $7,0$ гПа/500 км² в районе от $80,0^\circ$ в.д. до $82,5^\circ$ в.д., что определяет центр Южно-Азиатской депрессии. Фактическая величина лапласиана давления в центре депрессии составляет $\Delta p = 25,6$ гПа/500 км².

Полоса восходящих движений воздуха над Атлантикой расположена в широтной зоне от экватора до широты $20,0^\circ$ с.ш., со значениями лапласиана давления Δp менее $2,6$ гПа/500 км². Над Африканским континентом, начиная с Гринвичского меридиана, она вытягивается узкой полосой протяженностью 500–1000 км вдоль широтного круга φ от $20,0^\circ$ с.ш. до $30,0^\circ$ с.ш. Причем интенсивность поднимающегося воздуха местами достигает $17,9$ гПа/500 км² ($20,0^\circ$ с.ш., $17,5^\circ$ в.д.). Вдоль Аравийского полуострова наблюдается полоса интенсивного восходящего движения воздуха со значениями лапласиана до

Метеорология
Акимов Л.М.

$\Delta p = 12,5$ гПа/500 км². Наиболее мощный восходящий поток воздуха ($\Delta p = 22,6$ гПа/500 км²) отмечен в районе Пакистана и Индии, в предгорьях Гималаев, который связан с влиянием летнего муссона.

От Гринвичского меридиана и далее на восток на широтах φ от 0,0° с.ш. до 20,0° с.ш. располагается полоса нисходящего потока средней интенсивности, от $-5,0$ гПа/500 км² до $-6,0$ гПа/500 км². Наибольшие значения нисходящего потока наблюдаются ($\Delta p = -16,6$ гПа/500 км²) в районе Сомали.

Осенью (рис. 6) наблюдается перестройка вертикальных потоков по зимнему типу.

На рис. 6 видно, что осенью в широтной зоне φ от 90,0° с.ш. до 80,0° с.ш. усиливаются нисходящие потоки, а также наблюдается формирование интенсивного очага в районе о. Гренландия со значением лапласиана геопотенциала $\Delta p = -19,6$ гПа/500 км².

В широтной зоне от 80,0° с.ш. до 60,0° с.ш. усиливаются восходящие потоки, особенно в районе действия Исландской депрессии ($\Delta p = 29,8$ гПа/500 км²).

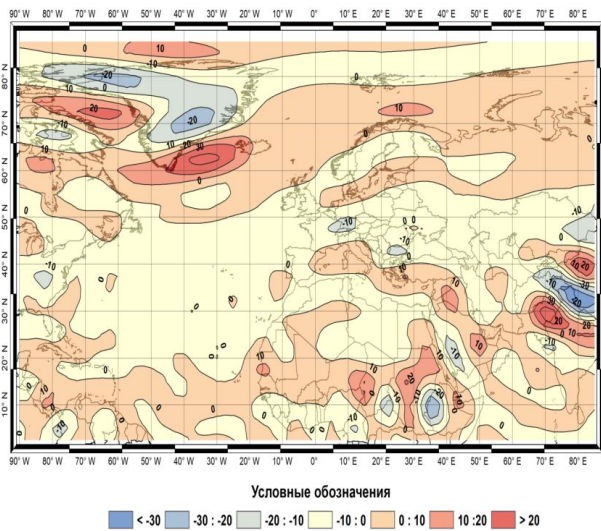


Рис. 6. Распределение лапласиана $\nabla^2 p [H^{\gamma=1000}]$ на АТ-1000 гПа, октябрь

Fig. 6. The Laplacian distribution at АТ-1000 hPa, October

В умеренных широтах φ (от 60,0° с.ш. до 20,0° с.ш.) отмечается полоса нисходящих движений воздуха слабой интенсивности (Δp от $-3,0$ гПа/500 км² до $-6,0$ гПа/500 км²), местами умеренной интенсивности (Δp от $-6,0$ гПа/500 км² до $-10,0$ гПа/500 км²). Наибольшие нисходящие потоки наблюдаются в районе Гималайских гор (до $-18,6$ гПа/500 км²).

На юге, в полосе широт φ от 20,0° с.ш. до 0,0° с.ш., расположена полоса восходящего потока воздуха слабой интенсивности (Δp от 3,0 гПа/500 км² до 6,0 гПа/500 км²). На Африканском континенте зафиксированы отдельные очаги умеренной интенсивности (Δp от 8,0 гПа/500 км² до 11,0 гПа/500 км²).

Заключение

Проведенные исследования позволили установить пространственную структуру вертикальных движений воздуха у поверхности земли. Установлено, что пространственное распределение вертикальных токов имеет квазизональную структуру. Наблюдается устойчивое периодическое чередование по широтным зонам полей восходящих и нисходящих потоков, в основном, сохраняющих свое местоположение в течение года.

Результаты исследования позволили выявить, что практически вся широтная зона, от экватора до широты 30° с.ш., охвачена восходящими потоками воздуха.

Выполненные расчеты лапласианов показали, что в полосе широт φ от 17,5° с.ш. до 55,5° с.ш. наблюдаются обширные поля нисходящих движений воздуха слабой, местами средней интенсивности.

Полоса восходящего потока средней интенсивности располагается в широтной зоне φ от 57,5° с.ш. до 75,0° с.ш. Также восходящие потоки средней интенсивности наблюдаются и на полюсе.

Между широтными зонами с восходящими потоками умеренных и высоких широт φ расположена зона, от 77,5° с.ш. до 82,5° с.ш., наиболее интенсивных нисходящих потоков воздуха, с максимальным нисходящим потоком на широте 80,0° с.ш., со значением лапласиана $-5,8$ гПа/(500 км)².

Метеорология

Акимов Л.М.

Установлено, что в южных и умеренных широтах зимой наблюдается усиление восходящих потоков, а в полярных широтах – нисходящих.

В теплое время года отмечается расширение площади нисходящих потоков в высоких широтах, от полюса до широты 77,5° с.ш.

Следует отметить большую устойчивость пространственного положения элементов вертикального движения воздуха. В основном наблюдается сохранение их направленности в различные сезоны года, с незначительным изменением интенсивности потока во времени.

Полученные результаты имеют большое теоретическое и практическое значение для климатологии и требуют дальнейшего исследования в глобальном масштабе.

Благодарность. «Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №20-17-00172».

Acknowledgment. «The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 20-17-00172».

Библиографический список

1. *Абрамович К.Г.* Условия образования и прогноз низких облаков // Труды Гидрометцентра СССР. 1973. Вып. 78. 124 с.
2. *Акимов Л.М., Задорожная Т.Н.* Методика прогноза суточной продолжительности инверсионной облачности, способствующей загрязнению воздушной среды в пункте Воронеж. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2013. № 1. С. 200–205.
3. *Акимов Л.М., Расторгуев И.П., Неижмак А.Н., Мухина Т.А.* Особенности прогнозирования опасных для авиации конвективных явлений погоды над юго-востоком Африки // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2018. № 2. С. 103–110.
4. *Алоян А.Е.* Моделирование динамики и кинетики газовых примесей в атмосфере. М.: Наука, 2005. 400 с.
5. *Арраго Л.Р., Швец М.Е.* К теории образования и эволюции не конвективной облачности // Труды ГГО. 1961. Вып. 121. С. 53–58.
6. *Багров Н.А.* Расчёт вертикальных движений воздуха с использованием уравнения вихря скорости // Тр. ЦИП. 1965. Вып. 144. С. 118–125.
7. *Бардин М.Ю.* Основные моды изменчивости повторяемости циклонов зимой в Атлантическом секторе // Метеорология и гидрология. 2000. № 1. С. 42–52.
8. *Берлянд М.Е.* Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.
9. *Бусингер Дж.А.* Основные понятия и уравнения. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей. СПб.: Гидрометеиздат, 1985. 338 с.
10. *Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К.* Турбулентность в пограничном слое атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат, 1989. 264 с.
11. *Васильева О.А., Михалкина С.А.* Применение функций нескольких переменных в теории поля: метод. указания // Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. 25 с.
12. *Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д.* Эксперименты по численному моделированию интенсивной конвекции // Метеорология и гидрология. 2008. № 9. С. 30–44.
13. *Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д., Павлюков Ю.Б.* Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF // Метеорология и гидрология. 2011. № 1. С. 5–18.
14. *Воробьев В.И.* Синоптическая метеорология. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 616 с.
15. *Гирс А.А.* Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. СПб.: Гидрометеиздат, 1974. 88 с.
16. *Груза Г.В., Петросянц М.А.* О роли орографии в энергетическом состоянии атмосферы // Тр. САНИГМИ, 1965. Вып. 29(38).
17. *Груза Г.В.* Макротурбулентность в общей циркуляции атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат., 1961. 99 с.
18. *Гусейнов Н.Ш.* Вертикальное распределение метеорологических параметров в пограничном слое атмосферы // Учен. зап. Рос. гос. гидромет. ун-та. СПб.: Гидрометеиздат., 2006. № 2. С. 79–85.
19. *Гущина Д.Ю.* Оценка воспроизведения особенностей глобальной циркуляции атмосферы и взаимосвязей между тропиками и умеренными широтами в моделях общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН и ARPEGE // Метеорология и гидрология. 2003. № 8. С. 5.
20. *Гущина Д.Ю.* Метеорологические аспекты явления "Эль-Ниньо – Южное колебание": автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 1996.
21. *Гущина Д.Ю.* Модификация Эль-Ниньо в условиях меняющегося климата: мониторинг, причины, удаленный отклик: автореф. дис. ... докт. геогр. наук / Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова. М., 2014.
22. *Дашко Н.А.* Курс лекций по синоптической метеорологии. Владивосток: Изд-во ДВГУ, 2005. 523 с.

Метеорология

Акимов Л.М.

23. Дзержевский Б.Л. Циркуляционные механизмы в атмосфере Северного полушария в XX столетии // Мат. метеоролог. исслед. Междувед. геофиз. комитета при Президиуме АН СССР. М., 1968. 248 с.
24. Дюбюк А.Ф. К вычислению вертикальных скоростей по полю давления // Труды НИУ УГМС. 1947. Сер. II. Вып. 24.
25. Железнова И.В., Гущина Д.Ю. Аномалии циркуляции в ячейках Уокера и Хэдди в период развития двух типов Эль-Ниньо // Метеорология и гидрология. 2017. № 10. С. 8–21.
26. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. СПб.: Гидрометеиздат., 1977. 712 с.
27. Зверев А.С. Синоптическая метеорология и основы предвычисления погоды. СПб.: Гидрометеиздат. изд-во, 1968. 776 с.
28. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Исследование радиолокационных характеристик для распознавания опасных явлений погоды, связанных с кучево-дождевой облачностью // Метеорология и гидрология. 2005. № 1. С. 84–95.
29. Кибель И.А. К вопросу о переваливании циклонов через горный хребет // Тр. НИУ ГУГМС. 1946. Сер. I. Вып. 30.
30. Кожевников В.Н. Обзор современного состояния теории мезомасштабных орографических неоднородностей поля вертикальных токов // Труды ЦАО. 1970. Вып. 98. С. 3–40.
31. Костарев С.В., Ветров А.Л., Сивков Б.А., Поморцева А.А. Исследование радиолокационных характеристик облачных систем при выпадении сильных дождей // Географический вестник = Geographical bulletin. 2020. № 3(54). С. 113–124. doi: 10.17072/2079-7877-2020-3-113-124.
32. Малинин В.Н., Радикевич В.М., Гордеева С.М., Куликова Л.А. Изменчивость вихревой активности атмосферы над Северной Атлантикой / СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 172 с.
33. Матвеев Л.Т. Вертикальные токи в пограничном слое атмосферы // Изв. АН СССР. Сер. геофизич. 1955. № 5. С. 453–461.
34. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат, 1984. 752 с.
35. Матвеев Л.Т. Условия образования и эволюции облаков под влиянием вертикальных токов и турбулентного обмена // Известия АН СССР. Сер. Геофиз. 1961. № 1. С. 130–140.
36. Монин А.С., Обухов А.М. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы // Труды Геофизин. АН СССР. 1954. № 24. С. 163–187.
37. Петренко Н.В. О влиянии меридиональных горных хребтов на эволюцию циклонов // Тр. ЦИП. 1948. Вып. 7(34).
38. Петросяню М.А. Влияние орографии на общую циркуляцию атмосферы // Метеорологические исследования. 1968. № 16. С. 210–238.
39. Петросяню М.А., Гущина Д.Ю., Лакеев С.Г., Семенов Е.К., Соколичина Н.Н. Исследование дальних связей явления "Эль-Ниньо – Южное колебание" применительно к району Австралийско – Азиатского муссона и умеренных широт России: отчет о НИР № 96-05-65303 (Российский фонд фундаментальных исследований).
40. Петросяню М.А., Семенов Е.К., Гущина Д.Ю., Соколичина Е.В., Соколичина Н.Н. Циркуляция атмосферы в тропиках: климат и изменчивость. М.: Макс Пресс. 2005. 670 с.
41. Салахова Р.Х. Климатологические труды А.И. Воейкова: их значение и актуальность. // Природа Симбирского Поволжья: сб. науч. тр. XIV межд. науч.-практ. конф. «Естественнонаучные исследования в Симбирском-Ульяновском крае». Ульяновск: Корпорация технологий продвижения, 2012. Вып. 13. С. 10–15.
42. Толмачева Н.И. Исследование влияния промышленных центров на развитие облачности и опасных явлений // Географический вестник Пермского университета. 2014. № 3(30). С. 79–89.
43. Толмачева Н.И., Ермакова Л.Н. Исследование параметров облачности и явлений по данным спутникового и радиолокационного зондирования // Географический вестник Пермского университета. 2011. № 3(18). С. 59–69.
44. Handlos Z.J., Back L.E. (2014), "Estimating Vertical Motion Profile Shape within Tropical Weather States over the Oceans", *Journal of Climate*, pp. 7667–7686. doi: 10.1175/JCLI-D-13-00602.1, URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/27/20/jcli-d-13-00602.1.xml> (дата обращения: 15.09.2020).
45. Back L.E., Bretherton C.S. (2009), "A Simple Model of Climatological Rainfall and Vertical Motion Patterns over the Tropical Oceans", *Journal of Climate*, pp. 6477–6497. doi: 10.1175/2009JCLI2393.1, URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/22/23/2009jcli2393.1.xml> (дата обращения: 15.09.2020).
46. Back L.E., Bretherton C.S. (2006), "Geographic variability in the export of moist static energy and vertical motion profiles in the tropical Pacific", *Geophysical Research Letters*. doi: 10.1029/2006GL026672, URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2006GL026672> (дата обращения: 15.09.2020).
47. Data and Imagery, Physical Sciences Laboratory, URL: <https://psl.noaa.gov/data/index.html> (дата обращения: 15.09.2020).
48. Global Surface Temperature Anomalies. URL: <https://www.ncdc.noaa.gov/monitoring-references/faq/anomalies.php#anomalies> (дата обращения: 15.09.2020).

References

1. Abramovich, K.G. (1973), "Conditions of formation and forecast of low clouds, Proceedings of the Hydrometeorological Center of the USSR, vol. 78.

Метеорология

Акимов Л.М.

2. Akimov, L.M., Zadorozhnaya, T.N. (2013), "Method of forecasting the daily duration of inversion cloudiness contributing to air pollution in Voronezh", *Bulletin of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*, no. 1, pp. 200–205.
3. Akimov, L.M. (2018), "Peculiarities of forecasting dangerous for aviation convective weather phenomena over southeastern Africa", *Bulletin of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*, no. 2, pp. 103–110.
4. Aloyan, A.E. (2005), "Modeling dynamics and kinetics of gas impurities in the atmosphere", Moscow: ed. Nauka, Russia
5. Arrago, L.R., Shvets, M.E. (1961), "To the theory of formation and evolution of nonconvective cloudiness", *Proceedings of GGO*, vol. 121, pp. 53–58.
6. Bagrov, N.A. (1965), "Calculation of vertical air motions using speed vortex equation", *Proc. CIP*, issue 144, pp. 118–125.
7. Bardin, M.Yu. (2000), "Main modalities of the cyclone frequency of occurrence in winter in the Atlantic sector", *Meteorology and hydrology*, no. 1, pp. 42–52.
8. Berlyand, M.E. (1985), *Forecasting and regulation of atmospheric pollution*, Leningrad: Gidrometeoizdat, Russia.
9. Businger, A. (1985), *Basic concepts and equations. Atmospheric turbulence and modeling of impurity propagation*, Leningrad: Gidrometeoizdat, Russia.
10. Byzova, N.L., Ivanov, V.N., Garger, E.K. (1989), *Turbulence in the atmospheric boundary layer*, Leningrad: Gidrometeoizdat, Russia.
11. Vasilyeva, O.A. (2006), *Application of functions of several variables in field theory: method. Instructions*, Samara: Publishing house of Samara State Aerospace University, Russia.
12. Veltischev, N.F. (2008), "Experiments of the intensive convection numerical modeling", *Meteorology and hydrology*, no 9, pp. 30–44.
13. Veltischev, N.F. (2011), "Short-term forecast of heavy precipitation and wind using WRF convection-resolving models", *Meteorology and Hydrology*, no. 1, pp. 5–18.
14. Vorobyov, V.I. (1991), *Synoptic meteorology*, Leningrad: Gidrometeoizdat, Russia.
15. Girs, A.A. (1974), *Macrocirculation method of long-term meteorological forecasts*, Leningrad: Gidrometeoizdat, Russia.
16. Gruza, G.V. (1965), *On the role of orography in the energy state of the atmosphere*, Tr. SANIGMI, vol. 29(38).
17. Gruza, G.V. (1961), *Macroturbulence in general circulation of the atmosphere*, Leningrad: Gidrometeoizdat, Russia.
18. Guseinov, N.Sh. (2006), "Vertical distribution of meteorological parameters in the boundary layer of the atmosphere", *Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University*, Saint-Petersburg: Ed. by Russian State Hydrometeorological University, no. 2, pp. 79–85.
19. Gushchina, D.Yu. (2003), "Estimation of reproducing the global atmospheric circulation features and interrelations between tropics and temperate latitudes in the models of general atmospheric circulation of IVM RAS and ARPEGE", *Meteorology and hydrology*, no. 8, pp. 5.
20. Gushchina, D.Yu. (1996), "Meteorological aspects of the phenomenon "El Niño – Southern Oscillation"", *Geography*, Moscow.
21. Gushchina, D.Yu. (2014), "Modification of El Niño under conditions of changing climate: monitoring, causes, remote response": Gushchina D.Yu., abstract of dissertation ... Doctor of Geography, Lomonosov Moscow State University, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow.
22. Dashko, N.A. (2005), *Course of lectures on synoptic meteorology*, Vladivostok: FEFU, Russia.
23. Dzerdzeevsky, B.L. (1968), "Circulation mechanisms in the atmosphere of the Northern Hemisphere in the 20th century", *Mater. of Meteorological Researches, International Geophysical Committee of the Presidium of the Academy of Sciences of the USSR*, Moscow, Russia.
24. Dubuc, A.F. (1947), "To calculation of vertical velocities by pressure field", *Proceedings of UGMS*, Series II, iss. 24.
25. Zheleznova, I.V. (2017), "Circulation anomalies in Walker and Hadley cells during the development of two types of El Niño", *Meteorology and hydrology*, no. 10, pp. 8–21.
26. Zverev, A.S. (1977), *Synoptic meteorology*, Leningrad: Hydrometeorological Publishing House, Russia.
27. Zverev, A.S. (1968), *Synoptic meteorology and the basis of weather forecasting*, Leningrad: Hydrometeorological Publishing House, Russia.
28. Kalinin, N.A. (2005), "Study of radar characteristics for recognition of hazardous weather phenomena associated with cumulonimbus-rain clouds", *Meteorology and hydrology*, no. 1, pp. 84–95.
29. Kibel, I.A. (1946), *On the issue of cyclones crossing a mountain range*, Tr. Scientific Inst. of Hydrometeorology and Meteorology, ser. 1, vol. 30.
30. Kozhevnikov, V.N. (1970), "Review of current state of theory of mesoscale orographic heterogeneities of vertical currents field", *Proceedings of CAO*, vol. 98, pp. 3–40.
31. Kostarev, S.V. (2020), "Study of radar characteristics of cloud systems during heavy rainfall", *Geographical bulletin*, no. 3(54), pp. 113–124. doi: 10.17072/2079-7877-2020-3-113-124.

Метеорология

Акимов Л.М.

32. Malinin, V.N. (1996), *Variability of atmospheric vortex activity over the North Atlantic*, St. Petersburg: Gidrometeoizdat, Russia.
33. Matveev, L.T. (1955), "Vertical currents in the boundary layer of the atmosphere", *Izv. of the Academy of Sciences of the USSR, Geophysical Ser. Geophys*, no. 5, pp. 453–461.
34. Matveev, L.T. (1984), *Course of General Meteorology. Physics of the Atmosphere*, Leningrad: Gidrometeoizdat, Russia.
35. Matveev, L.T. (1961), "Conditions of cloud formation and evolution under the influence of vertical currents and turbulent exchange", *Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Ser. Geophy*, no. 1, pp. 130–140.
36. Monin, A.S., Obukhov, A.M. (1954), "Basic regularities of turbulent mixing in the surface atmospheric layer", *Trudy Geofizin. ACAD. OF THE USSR*, no. 24, pp. 163–187.
37. Petrenko, N.V. (1948), *On the influence of meridional mountain ranges on the evolution of cyclones*, Tr. Central Institute of Experimental Paleology, vol. 7(34).
38. Petrosyants, M.A. (1968), "Influence of orography on the general circulation of the atmosphere", *Meteorological studies*, no. 16, pp. 210–238.
39. Petrosyants, M.A. Study of Long Range Relationships of the El Niño-Southern Oscillation Phenomenon as Applied to the Australian-Asian Monsoon and Temperate Latitudes of Russia, ed. Petrosyants M.A., Gushchina D.Yu., Lakeev S.G., Semenov E.K., Sokolikhina N.N. Report on R&D Program No 96-05-65303 (Russian Foundation for Basic Research).
40. Petrosyants, M.A. (2005), *Atmospheric circulation in the tropics: climate and variability*, ed. Petrosyants M.A., Semyonov E.K., Gushchina D.Yu., Sokolikhina E.V., Sokolikhina N.N., Moscow: Max Press.
41. Salakhova, R.Kh. (2012), "Climatological works of A.I. Voeikov: their significance and actuality", *Nature of Simbirskoye Povolzhye: Collection of scientific papers of XIV interregional scientific-practical conference "Natural-science research in Simbirsk-Ulyanovsk region"*. Ulyanovsk: Publishing house "Corporation of promotion technologies", no. 13, pp. 10–15.
42. Tolmacheva, N.I. (2014), "Study of influence of industrial centers on development of cloudiness and dangerous phenomena", *Geographical Bulletin of Perm University*, no. 3(30), pp. 79–89.
43. Tolmacheva, N.I. (2011), "Research of cloudiness parameters and phenomena based on satellite and radar sensing data", *Geographical Bulletin of Perm University*, no. 3(18), pp. 59–69.
44. Handlos Z.J., Back L.E. (2014), "Estimating Vertical Motion Profile Shape within Tropical Weather States over the Oceans", *Journal of Climat*, pp. 7667–7686, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00602.1, available at: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/27/20/jcli-d-13-00602.1.xml> (accessed 15.09.2020).
45. Back L.E., Bretherton C.S. (2009), "A Simple Model of Climatological Rainfall and Vertical Motion Patterns over the Tropical Oceans", *Journal of Climate*, pp. 6477–6497, doi: 10.1175/2009JCLI2393.1, available at: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/22/23/2009jcli2393.1.xml> (accessed 15.09.2020).
46. Back L.E., Bretherton C.S. (2006), "Geographic variability in the export of moist static energy and vertical motion profiles in the tropical Pacific", *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1029/2006GL026672, available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2006GL026672> (accessed 15.09.2020).
47. Data and Imagery, Physical Sciences Laboratory, available at: <https://psl.noaa.gov/data/index.html> (accessed 15.09.2020).
48. Global Surface Temperature Anomalies, available at: <https://www.ncdc.noaa.gov/monitoring-references/faq/anomalies.php#anomalies> (accessed 15.09.2020).

Поступила в редакцию: 10.11.2020

Сведения об авторах

About the authors

Леонид Мусамудинович Акимов

кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой природопользования, Воронежский государственный университет; 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1

Leonid M. Akimov

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor; Head of the Department of Environmental Management, Voronezh State University;

1, Universitetskaya ploshchad, Voronezh, Russia, 394018

e-mail: akl63@bk.ru

e-mail: root@geogr.vsu.ru

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Акимов Л.М. Анализ вертикальных движений воздуха над Атлантико-Европейским сектором // Географический вестник = Geographical bulletin. 2021. № 2(57). С. 96–109. doi: 10.17072/2079-7877-2021-2-96-109.

Please cite this article in English as:

Akimov, L.M. (2021). Analysis of vertical movements of air over the Atlantic-European sector. *Geographical bulletin*. No. 2(57). Pp. 96–109. doi: 10.17072/2079-7877-2021-2-96-109.