

ЭНЕРГЕТИКА ЦИКЛОНОВ УМЕРЕННЫХ ШИРОТ



*Н.А. Калинин,
доктор географических наук,
заведующий кафедрой
метеорологии и охраны
атмосферы,
Пермский государственный
национальный исследовательский
университет*



*А.Л. Ветров,
кандидат географических наук,
доцент кафедры метеорологии
и охраны атмосферы,
Пермский государственный
национальный исследовательский
университет*

Впервые получены надежные количественные оценки запасов полной, вихревой кинетической и доступной потенциальной энергии, а также составляющих их баланса и некоторых кинематических особенностей на разных стадиях эволюции циклонических образований умеренных широт. Определена роль механизмов, формирующих баланс различных видов энергии в циклонических вихрях. Сформулированы наиболее перспективные проблемы по использованию результатов диагностических исследований в области энергетики атмосферных вихрей синоптического масштаба, а также региональной энергетики.

Проблема энергетики атмосферных процессов является одной из важнейших в современной метеорологии. Распределение источников и стоков энергии, ее перенос и трансформация отражают все основные черты атмосферных процессов, их характер и интенсивность. Обоснованность любой гипотезы, относящейся к атмосфере, определяется, в первую очередь, тем, насколько удовлетворительно она объясняет важнейшие энергетические функции циркуляционного механизма.

Современное представление об энергетике атмосферы возникло из принципов, выдвинутых в конце XIX – начале XX века О. Рейнольдсом и М. Маргулесом, а также из основных положений классической гидротермодинамики. Общие выражения, описывающие генерацию, перераспределение и диссипацию энергии, были сформулированы в 40–50-х годах XX столетия Б. Гаурвицем и В. Старром [3].

Плодотворность энергетического под-

хода к изучению атмосферы определяется тем, что он обеспечивает единую шкалу при оценке вклада изучаемых процессов в развитие общей циркуляции атмосферы (ОЦА) и, таким образом, позволяет описать физические механизмы этого развития. Возможность реализации последнего определяется тем, что виды энергии, подверженные преобразованию, характеризуют специфику этих процессов и соответствующий анализ позволяет в простой и обозримой форме отразить их существенные особенности. Кроме того, наличие значительных запасов определенного вида энергии в атмосфере может использоваться как прогностический критерий процесса. Важным этапом в разработке способов активных воздействий на атмосферные процессы также является изучение их энергетики.

В настоящее время исследования в области атмосферной энергетики ведутся в двух направлениях: теоретическом и диагностическом. В рамках первого направ-

ления на основе системы уравнений гидротермодинамики были получены значительные результаты по изучению энергетики ОЦА и определены принципы численного долгосрочного прогноза погоды и короткопериодных изменений климата. Диагностические исследования атмосферной энергетики включают разработку численных методов расчета, проведение и анализ результатов вычисления по эмпирическим данным параметров атмосферы, которые непосредственно не измеряются, а могут быть только рассчитаны (потоки, притоки энергии и т.д.). Эти исследования направлены на изучение механизмов преобразования энергии в атмосфере, позволяющих выявить ее источники, стоки и интенсивность. Важным моментом диагностических исследований является тот факт, что одним из основных критериев, позволяющих оценивать адекватность моделей реальной атмосферы, служит энергетика. Оценка запасов энергии, интенсивность ее генерации, т.е. характеристик, отражающих основные черты атмосферной циркуляции, необходимы при проведении практически любого численного эксперимента [5].

Планетарную атмосферу целесообразно разделять на элементы в соответствии с распределением источников и связанными с этим различиями в свойствах циркуляции. Используя термодинамическое понятие тепловой машины, В.В. Шулейкин выделил «машину I рода», в которой основное нагревание атмосферы сосредоточено в тропических широтах. В полярных областях нагревание минимально, потери энергии велики и в целом для атмосферы они играют роль холодильников. В поясе умеренных широт (зона между субтропическими и субполярными широтами, примерно от 40 до 65° в северном полушарии и от 42 до 58° в южном) сосредоточен основной энергообмен между нагревателем и холодильниками.

Циклоны умеренных широт (ЦУШ) являются важнейшими элементами общей циркуляции атмосферы. Развиваясь на фоне процессов планетарного масштаба, они вместе с антициклонами превращаются в стационарные барические обра-

зования и становятся компонентами высотных деформационных полей, участвуя, тем самым, в формировании высотных фронтальных зон (ВФЗ), являющихся источниками возникновения подвижных циклонов и антициклонов. Подвижные циклоны и антициклоны осуществляют обмен воздушными массами между высокими и низкими широтами, уменьшают и поддерживают в определенных сезонных границах меридиональный градиент температуры, возникающий вследствие неравномерного притока солнечной радиации к подстилающей поверхности. При этом над отдельными районами происходит концентрация больших градиентов температуры, образуя фронтальные зоны. В нижней и средней тропосфере (в умеренных широтах примерно до 5–6 км) формируются фронтальные разделы, системы облаков, осадков и другие явления. Если условия для фронтогенеза благоприятны, то градиенты температуры и давления, а вместе с ними и скорость ветра, постепенно увеличиваются. Увеличение данных характеристик ограничено критическим значением градиента потенциальной энергии, по достижении которого потоки в ВФЗ теряют устойчивость и начинается ее волновое возмущение, а затем образование циклонов и антициклонов. Критические значения градиентов температуры и давления, а также скорости ветра достигаются лишь в отдельных участках сравнительно узких ВФЗ. При этом средние значения градиентов и скорости ветра остаются ниже критических, а разность температуры между экватором и полюсом – меньше значения, соответствующего режиму лучистого равновесия.

Наиболее важными для атмосферных процессов являются следующие виды энергии: 1) кинетическая энергия горизонтальных движений $K = (u^2 + v^2) / 2$; 2) потенциальная энергия $\Phi = gz$; 3) внутренняя энергия $I = c_v T$; 4) энергия фазовых переходов воды $E_\phi = Lq$ и лучистая энергия E_λ . Здесь u, v – горизонтальные составляющие скорости ветра, м/с; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного паде-

ния; z – высота, м; $c_v = 720$ Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме; T – температура, К; $L = 2,49 \cdot 10^6$ Дж/кг – скрытая теплота парообразования при $t = 0$ °С; q – массовая доля водяного пара, г/кг [2, 6, 7].

Поскольку движение атмосферы носит турбулентный характер, то все метеорологические величины испытывают нерегулярные и беспорядочные изменения в пространстве и во времени. Для получения уравнений, адекватных такому движению, представим входящие в эти уравнения величины в виде суммы средней (\bar{a}) и пульсационной (a') составляющей и проведем по отношению к полученным выражениям процедуру осреднения. Тогда уравнения баланса средней кинетической энергии горизонтальных движений, средней потенциальной и внутренней энергии, записанные для равной массы в некотором изобарическом слое p_1, p_2 , будут иметь следующий вид [5]:

$$\begin{aligned} & \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \frac{\partial \bar{K}}{\partial t} dp}_{K_1} = - \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \left(\frac{\partial \bar{K}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{K}\bar{v}}{\partial y} \right) dp}_{K_2} - \\ & - \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \frac{\partial \bar{K}\bar{\tau}}{\partial p} dp}_{K_3} - \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \left(\frac{\partial \bar{K}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{K}'v'}{\partial y} \right) dp}_{K_4} - \\ & - \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \frac{\partial \bar{K}'\tau'}{\partial p} dp}_{K_5} - \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial y} \right) dp}_{K_6} + \\ & + \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \left(\bar{u}'u' \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{u}'v' \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \bar{v}'v' \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) dp}_{K_7} + \\ & + \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \left(\bar{u}'\tau' \frac{\partial \bar{u}}{\partial p} + \bar{v}'\tau' \frac{\partial \bar{v}}{\partial p} \right) dp}_{K_8}, \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial t} dp}_{\Phi_1} = - \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \left(\frac{\partial \bar{\Phi}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\Phi}\bar{v}}{\partial y} \right) dp}_{\Phi_2} - \\ & - \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \frac{\partial \bar{\Phi}\bar{\tau}}{\partial p} dp}_{\Phi_3} - \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \left(\frac{\partial \bar{\Phi}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\Phi}'v'}{\partial y} \right) dp}_{\Phi_4} - \end{aligned}$$

$$- \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \frac{\partial \bar{\Phi}'\tau'}{\partial p} dp}_{\Phi_5} - \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \bar{\tau}\bar{\alpha} dp}_{\Phi_6} - \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \tau'\alpha' dp}_{\Phi_7}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \frac{\partial \bar{I}}{\partial t} dp}_{I_1} = - \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \left(\frac{\partial \bar{I}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{I}\bar{v}}{\partial y} \right) dp}_{I_2} - \\ & - \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \frac{\partial \bar{I}\bar{\tau}}{\partial p} dp}_{I_3} - \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \left(\frac{\partial \bar{I}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{I}'v'}{\partial y} \right) dp}_{I_4} - \\ & - \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \frac{\partial \bar{I}'\tau'}{\partial p} dp}_{I_5} + \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial y} \right) dp}_{I_6} + \\ & + \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \bar{\tau}\bar{\alpha} dp}_{I_7} + \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \tau'\alpha' dp}_{I_8} + \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \frac{dQ}{dt} dp}_{I_9}. \quad (3) \end{aligned}$$

Согласно уравнению (1), локальные изменения запасов средней кинетической энергии горизонтальных движений (K_1) формируются вследствие дивергенции горизонтального (K_2) и вертикального (K_3) потоков кинетической энергии среднего движения, дивергенции горизонтального (K_4) и вертикального (K_5) потоков кинетической энергии турбулентных пульсаций, трансформации (генерации или диссипации) средней кинетической энергии горизонтальных движений под действием силы горизонтального барического градиента (K_6), а также трансформации средней кинетической энергии горизонтальных движений вследствие турбулентного обмена по горизонтали (K_7) и по вертикали (K_8).

Следует напомнить, что атмосферную турбулентность можно представить в виде движений микро-, мезо- и макромасштаба. При развитии микромасштабной турбулентности происходит передача энергии от движений мелкого масштаба к движениям еще более мелких масштабов и в конечном итоге переход ее в тепло, т.е. имеет место диффузионный процесс. В случае же мезо- и макромасштабных движений могут происходить два противоположных процесса: передача энергии от движений более крупного масштаба к движениям более мелкого масштаба, т.е. диффузионный процесс и (реже) передача

энергии от движений более мелких масштабов к движениям более крупных масштабов. В данном случае говорят о движениях с отрицательной вязкостью. Последний процесс особенно важен при развитии циклонов и формировании интенсивных зональных движений в умеренных широтах, в частности струйных течений. Если для расчета параметров энергетики используются данные температурно-ветрового зондирования атмосферы, то микромасштабные пульсации уже отфильтрованы, так что остается только вклад мезо- и макротурбулентности.

Таким образом, два последних слагаемых в уравнении (1) характеризуют процесс трансформации средней кинетической энергии горизонтальных движений, т.е. ее генерацию или диссипацию во внутреннюю энергию вследствие горизонтального (K_7) и вертикального (K_8) мезо- и макротурбулентного обмена. Из уравнений (2) и (3) следует, что локальные изменения запасов средней потенциальной и внутренней энергии (Φ_1, I_1) формируются благодаря дивергенции горизонтального (Φ_2, I_2) и вертикального (Φ_3, I_3) потоков потенциальной и внутренней энергии среднего движения, дивергенции горизонтального (Φ_4, I_4) и вертикального (Φ_5, I_5) потоков потенциальной и внутренней энергии турбулентных пульсаций, взаимному превращению потенциальной и внутренней энергии среднего движения ($\Phi_6 = -I_7$) и турбулентных пульсаций ($\Phi_7 = -I_8$), а также взаимному превращению кинетической и внутренней энергии среднего движения ($K_6 = -I_6$). Слагаемое I_9 в правой части (3)

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{1}{\rho}(I_{\text{л}} + I_{\text{ф}} + I_{\text{д}}) \quad (4)$$

отражает изменение внутренней энергии, связанное с неадиабатическими источниками средней внутренней энергии, а именно лучистым теплообменом ($I_{\text{л}}$), фазовыми переходами воды в атмосфере ($I_{\text{ф}}$) и взаимным превращением (трансформацией) внутренней и кинетической энергии в результате турбулентного перемешивания ($I_{\text{д}}$). Физическая интерпретация механизма влияния неадиабатиче-

ских источников на изменение средней внутренней энергии заключается в том, что выделяемое (или затрачиваемое) тепло в результате действия этих источников изменяет температуру соответствующей массы воздуха, а следовательно, и среднюю внутреннюю энергию.

Известно, что возможным источником образования кинетической энергии в атмосфере, наряду с трансформацией ее из движений одних масштабов в другие, является преобразование полной потенциальной энергии (сумма потенциальной и внутренней энергии) в кинетическую. Уравнения баланса кинетической, потенциальной и внутренней энергии отражают все основные энергетические преобразования в атмосфере, в том числе потенциальной и внутренней энергии в кинетическую и обратно. Характерная величина запасов кинетической энергии на 2–3 порядка меньше запасов потенциальной и внутренней. Примерно в том же соотношении находятся и величины главных членов в этих уравнениях. Поэтому если в уравнении баланса кинетической энергии слагаемые, характеризующие взаимные преобразования кинетической энергии с внутренней и потенциальной, невозможно рассчитать прямыми методами, вследствие отсутствия надежных данных о динамических параметрах в атмосфере, то их определение из уравнений (2) и (3) может дать принципиально ошибочный результат, так как они являются малыми разностями больших величин главных членов этих уравнений. В связи с этим для общей циркуляции атмосферы в 1955 г. Э. Лоренцом была предложена концепция о доступной потенциальной энергии (ДПЭ), согласно которой рассматривается только часть полной потенциальной энергии, реально участвующая в преобразованиях. Для незамкнутой системы (циклон, антициклон) ДПЭ интерпретируется как вклад рассматриваемой области в глобальное значение ДПЭ. Доступная потенциальная энергия может быть определена по формуле Э. Лоренца [7]:

$$A = \frac{1}{2} c_p \left[\frac{\gamma_a \sigma_T^2}{(\gamma_a - \bar{\gamma}) \bar{T}} \right], \quad (5)$$

где γ_a – сухоадиабатический градиент; σ_T^2 – взвешенное значение дисперсии температуры воздуха на изобарической поверхности; γ – вертикальный градиент температуры воздуха. Горизонтальная черта сверху означает осреднение по изобарической поверхности.

Для характеристики степени интенсивности генерации ДПЭ за счет неадиабатических притоков тепла необходимо определить коэффициент эффективности полной потенциальной энергии, который можно рассчитать по формуле

$$N = \frac{1}{2} \left[\frac{\gamma_a \sigma_T^2}{(\gamma_a - \bar{\gamma}) \bar{T}^2} \right]. \quad (6)$$

Из (5) и (6) следует, что ДПЭ и N могут принимать отрицательные значения. Физически это означает, что ДПЭ в этом случае генерируется за счет отрицательного неадиабатического притока тепла, например, при адвекции холодных воздушных масс, когда $\gamma_a < \bar{\gamma}$. При $\sigma_T^2 = 0$ и $\gamma_a = \bar{\gamma}$ величины A и N не определяются ввиду того, что отсутствуют условия для генерации ДПЭ.

Уравнение баланса средней доступной потенциальной энергии имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} dp}_{A_1} = - \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \left(\frac{\partial (c_p N \bar{T} \bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial (c_p N \bar{T} \bar{v})}{\partial y} \right) dp}_{A_2} - \\ & \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \frac{\partial (c_p N \bar{T} \bar{\tau})}{\partial p} dp}_{A_3} - \\ & \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \left(\frac{\partial (c_p N \bar{T} \bar{u}')}{\partial x} + \frac{\partial (c_p N \bar{T} \bar{v}')}{\partial y} \right) dp}_{A_4} - \\ & \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \frac{\partial (c_p N \bar{T} \bar{\tau}')}{\partial p} dp}_{A_5} + \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \bar{\tau} \bar{\alpha} dp}_{A_6} + \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \bar{\tau}' \alpha' dp}_{A_7} + \\ & \underbrace{\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} N \frac{dQ}{dt} dp}_{A_8} + \underbrace{\frac{1}{g} c_p T_0 N_0 \frac{\partial p_0}{\partial t}}_{A_9}. \quad (7) \end{aligned}$$

Слагаемое в левой части (A_1) характери-

зует локальные изменения средней ДПЭ. Первые четыре слагаемых правой части этого уравнения описывают трехмерную дивергенцию осредненной (A_2, A_3) и пульсационной (A_4, A_5) ДПЭ, пятое и шестое слагаемые обуславливают трансформацию осредненной (A_6) и пульсационной (A_7) ДПЭ (преобразование с кинетической энергией при вертикальном перераспределении воздуха в столбе атмосферы), седьмое слагаемое (A_8) определяет изменение средней ДПЭ в результате притоков тепла неадиабатического происхождения (радиация, фазовые преобразования водяного пара, турбулентность), наконец последнее, восьмое, слагаемое (A_9) описывает изменение средней ДПЭ за счет изменения массы воздуха в столбе атмосферы.

До начала 90-х годов XX века в диагностике энергетического режима ЦУШ мировой наукой были достигнуты определенные успехи. Однако известные результаты были недостаточно полны и часто противоречили друг другу. В связи с этим нами была поставлена задача по разработке количественной модели перераспределения и преобразования различных видов энергии и выявлению роли механизмов, формирующих энергетический баланс в циклонах умеренных широт на разных стадиях их эволюции. Основные результаты этих исследований сводятся к следующему:

1. Среднестатистический циклон умеренных широт с площадью основания 10^{12} м^2 ($1000 \times 1000 \text{ км}$) выделяет каждую секунду своего существования $1,1 \cdot 10^{18} \text{ Дж}$, т.е. мощность такого циклона составляет $1,1 \cdot 10^{18} \text{ Вт}$, а максимальные величины могут превышать это значение в 2–3 раза. При этом установленная мощность крупнейшей в России Саяно-Шушенской ГЭС составляет $6,4 \cdot 10^9 \text{ Вт}$, а общая мощность потребляемой человечеством электроэнергии в 2007 году в среднем оценивалась в $1,9 \cdot 10^{12} \text{ Вт}$. Одновременно в атмосфере Земли развивается в среднем 20–25 циклонов, поэтому ставить вопрос о возможности управления погодой хотя бы в одном таком барическом образовании пока преждевременно.

2. В процессе углубления циклонов все виды энергии, кроме кинетической, уменьшаются, что обусловлено трансформацией доступной части полной потенциальной энергии в кинетическую. От стадии максимального развития циклонов до момента их заполнения происходит уменьшение всех видов энергии, кроме потенциальной, которая в целом во всем исследуемом слое может как уменьшаться, так и увеличиваться. При этом в слое атмосферы от поверхности земли до 5 км рост потенциальной энергии составляет 80 % изменения общих ее запасов. Таким образом, заполнение циклонов происходит в основном за счет увеличения массы воздуха в нижней тропосфере.

3. Основным механизмом циклогенеза, а следовательно, и роста кинетической энергии является гидродинамическая неустойчивость непрерывно стратифицированного воздушного потока. Из различных ее видов наибольшую роль играет бароклинная неустойчивость. Скорость образования кинетической энергии за счет бароклинной неустойчивости равна в среднем $4,35 \text{ Вт/м}^2$. Другим видом неустойчивости, который вносит существенно меньший вклад в энергетiku циклогенеза, является баротропная неустойчивость, величина которой оценивается нами в среднем в $0,32 \text{ Вт/м}^2$. Таким образом, главная роль в энергетических преобразованиях циклонических вихрей в процессе их эволюции принадлежит бароклинной неустойчивости атмосферных процессов.

4. В результате действия механизма горизонтальной адвекции запасы кинетической энергии в процессе эволюции ЦУШ увеличиваются со скоростью $1,58 \text{ Вт/м}^2$. Под действием механизма вертикальной адвекции происходит уменьшение запасов кинетической энергии со скоростью $2,11 \text{ Вт/м}^2$. Таким образом, в целом под действием внешних источников запасы кинетической энергии уменьшаются.

5. Проанализированы все имеющиеся к настоящему времени оценки притока (стока) кинетической энергии в атмосферных образованиях синоптического масштаба за счет работы силы горизон-

тального барического градиента. Выявлено, что за счет работы силы горизонтального барического градиента происходит уменьшение кинетической энергии в ЦУШ. Это уменьшение обусловлено расходом кинетической энергии на поддержание противогradientных течений, которые, в свою очередь, увеличивают дивергенцию скорости в свободной атмосфере, являющейся основным фактором углубления циклона. Тем самым показана несостоятельность утверждений о росте кинетической энергии за счет работы силы горизонтального барического градиента в углубляющихся тропосферных областях пониженного давления [4].

6. На основании работы Ч. Тсай и С. Као, где было показано, что источником кинетической энергии для крупномасштабных составляющих атмосферной циркуляции является доступная потенциальная энергия, накопление которой в спектральной области, соответствующей движениям синоптического масштабов, происходит в результате взаимодействий с движениями других масштабов, можно сделать вывод о том, что компенсация потерь кинетической энергии, идущей на поддержание противогradientных течений, осуществляется в результате нелинейных взаимодействий движений различных масштабов и зонального потока путем механизмов бароклинной и баротропной неустойчивости. Однако полной компенсации потерь кинетической энергии при этом все же не происходит, поэтому в целом под действием внутренних источников в циклонах запасы кинетической энергии уменьшаются.

7. Уменьшение кинетической энергии от стадии максимального развития до стадии заполнения превышает ее рост в процессе углубления ЦУШ, поэтому запасы кинетической энергии на стадии заполнения в среднем составляют 67 % запасов на начальной стадии, хотя в нижнем 3-километровом слое атмосферы происходит увеличение запасов кинетической энергии по сравнению с их первоначальными накоплениями. Таким образом, в средней и верхней атмосфере суммарное действие внешних и внутренних источников кине-

тической энергии приводит к уменьшению ее запасов, а в нижней тропосфере – к их росту.

8. Согласно большинству предыдущих исследований в циклонических вихрях преобладает передача вихревой кинетической энергии от возмущений к течению более крупного масштаба. В рассмотренных нами случаях отдельные циклоны в некоторых слоях также отдают вихревую кинетическую энергию основному потоку, однако средние оценки соответствуют передаче кинетической энергии основного течения к возмущениям со скоростью $0,47 \text{ Вт/м}^2$. В связи с тем, что в стационарном турбулентном потоке кинетическая энергия основного движения непрерывно переходит в кинетическую энергию флуктуаций, сделанные нами выводы относительно механизма перехода основного потока в вихревой являются более обоснованными.

9. На основании вычисления компонентов уравнений баланса кинетической, потенциальной и внутренней энергии построена количественная схема формирования энергетического баланса полной энергии в циклонических образованиях. Эта схема представляет собой эмпирическую энергобалансовую модель циклона. Проанализирован вклад каждого слагаемого в структуре баланса полной энергии. Рассмотрены трансформационные переходы одних видов энергии в другие. Определены условия их существования и интенсивность.

10. На возникновение ЦУШ большое влияние оказывает генерация ДПЭ вследствие крупномасштабной конденсации. По мере своего развития циклонические вихри черпают ДПЭ из фронтальных систем, где генерируется большая часть доступной потенциальной энергии вследствие крупномасштабной конденсации. Динамика развития циклона приводит к тому, что на начальной стадии развития в роли основного источника генерации ДПЭ выступает теплый фронт, на стадии максимального развития – холодный, на заключительной стадии развития – фронт окклюзии.

11. Показано, что величина ДПЭ в ци-

клонических вихрях может служить количественной мерой степени их бароклинности. Предложена методика прогноза эволюции циклонов у поверхности Земли на основе анализа запасов ДПЭ. В качестве статистической базы использовался параметрический одномерный линейный дискриминантный анализ. Приведенные оценки оправдываемости прогнозов на зависимом и независимом материале свидетельствуют о высокой эффективности использования запасов ДПЭ в качестве характеристики, определяющей эволюцию ЦУШ у поверхности Земли.

12. Установлено, что главная прогностическая физико-математическая модель Гидрометцентра России Т85L31 удовлетворительно воспроизводит процесс генерации ДПЭ за счет фазовых переходов воды в ЦУШ. Наиболее адекватно модель описывает генерацию ДПЭ вследствие крупномасштабной конденсации на вторые и третьи сутки работы модели [1].

Из изложенного следует, что в области энергетики атмосферных вихрей синоптического масштаба, а также региональной энергетики достигнуты определенные успехи. На кафедре метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета сформирована и постоянно развивается с освоением все новых исследовательских направлений в области метеорологии научная школа под руководством Н.А. Калинина, в рамках которой приоритетными являются вопросы энергетики атмосферы. В плане дальнейшего изучения наиболее перспективными как с теоретической, так и с практической стороны являются следующие проблемы:

1. Генерация доступной потенциальной энергии за счет неадиабатических источников тепла. К механизмам этой генерации относятся эффекты фазовых переходов влаги, радиационного и турбулентного энергообмена.

2. Энергетика блокирующих циклонов и антициклонов, формирующих аномальную погоду на обширных территориях.

3. Верификация гидродинамических моделей атмосферы путем исследования

качества воспроизведения с их помощью энергетического цикла, отражающего действие наиболее сложных физических механизмов, управляющих процессами возникновения и развития циркуляционных систем.

Рассмотрение перечисленных проблем должно явиться следующим шагом в проведении и использовании результатов диагностических исследований в области энергетики атмосферных вихрей синоптического масштаба, а также региональной энергетики.

Библиографический список

1. *Ветров А.Л.* Трансформация доступной потенциальной энергии в циклонах вследствие фазовых переходов воды / под ред. *Н.А. Калинина*. – Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2007. – 100 с.
2. *Воробьев В.И.* Синоптическая метеорология. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 616 с.
3. *Калинин Н.А.* Энергетика циклонов умеренных широт. – Пермь: изд-во Перм. ун-та, 1999. – 192 с.
4. *Калинин Н.А., Связов Е.М.* Трансформация кинетической энергии в циклонах умеренных широт. – Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2008. – 116 с.
5. *Калинин Н.А.* Динамическая метеорология: учебник. – Перм. гос. ун-т, Пермь; РГГМУ, СПб. – Изд. второе, испр. – Перм. кн. изд-во, 2009. – 256 с.
6. *Матвеев Л.Т.* Физика атмосферы. – СПб.: Гидрометеиздат, 2000. – 780 с.
7. *Пальмен Э., Ньютон Ч.* Циркуляционные системы атмосферы: пер. с англ. / под ред. *С.П. Хромова*. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 615 с.