

Д.В. Пишняк, асп., Г.П. Ивус, к.геогр.н., проф.,
Одесский государственный экологический университет

В.М. Шпиг, к.геогр.н., И.В. Будах
Украинский научно-исследовательский гидрометеорологический институт

РАСЧЕТ ДОСТУПНОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ РЕГИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ WRF-ARW

Выполнена адаптация расчетной формулы доступной потенциальной энергии (ДПЭ) применительно к данным регионального моделирования атмосферы с высоким пространственным разрешением. Для нескольких случаев холодных атмосферных фронтов получено распределение общей по области и локальной мезомасштабной ДПЭ.

Ключевые слова: относительная потенциальная энергия, энергия неустойчивости, энергия фазовых переходов, изэнтропическая поверхность, атмосферный фронт.

Введение. Погодные условия определяются очень широким спектром атмосферных процессов, различающихся на несколько порядков по масштабам времени и размера. В своей основе они включают различные физические механизмы, так или иначе связанные с преобразованиями энергии атмосферы. Существует несколько основных видов энергии, которые включают внутреннюю, потенциальную, кинетическую и скрытую тепловую энергию фазовых переходов атмосферной влаги. Механизмы их обращения достаточно просты и понятны, однако атмосфера располагает множеством регуляторных факторов (например, таких как сила Кориолиса), препятствующих прямому межвидовому переходу энергии. Энергетический анализ является ключом к комплексному пониманию атмосферных процессов и сопутствующих явлений. Несмотря на большое количество публикаций, посвященных данной тематике [1, 2, 3], этот вопрос все еще остается актуальным в теоретическом плане.

В работе рассматривается проблема оценки доступной потенциальной энергии (ДПЭ) как основного вида энергии, ответственного за поддержание циркуляции атмосферы [4]. **Целью исследования** является разработка и апробация метода расчета ДПЭ, использующего преимущества данных моделирования атмосферы высокого пространственного разрешения, а также физико-теоретическая интерпретация полученных результатов.

Методы исследования. Согласно определению, ДПЭ – это часть потенциальной энергии системы, которая может быть преобразована в кинетическую [5, 6], или, иными словами, ДПЭ – это превышение фактической полной потенциальной энергии над недоступной ее частью. Последнее утверждение указывает на необходимость определения некоторого порогового (эталонного) значения, отделяющего доступную и недоступную части – энергии минимально устойчивого гидростатического равновесия.

Существует несколько форм записи практически применимых выражений для оценки ДПЭ, например, в изэнтропической системе вертикальных координат [6]

$$ДПЭ = \frac{c_p}{g(1+k)p_0} \iint_S \int_0^\infty (p^{1+k} - \bar{p}^{1+k}) d\theta dS, \quad (1)$$

или несколько иная форма записи [3], и использованная в [7]

$$ДПЭ = \frac{c_p}{g} \int_0^{p_0} T \frac{p^k - \bar{p}^k}{p^k} dp. \quad (2)$$

Здесь p_0 – давление у поверхности земли (1000 гПа); \bar{p} – эталонная величина давления, определяемая как среднее на изэнтропической поверхности; p – давление в некоторой точке изэнтропической поверхности; T – температура по абсолютной шкале; c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; g – ускорение свободного падения; $k = R/c_p$; R – удельная газовая постоянная сухого воздуха; θ – потенциальная температура; S – площадь.

Также Лоренцем Э. Н. [6] было показано, что суммарная ДПЭ пропорциональна величине взвешенной дисперсии температуры на изобарической поверхности σ_T^2

$$ДПЭ = \frac{c_p}{2} \left(\frac{\gamma_a \sigma_T^2}{(\gamma_a - \bar{\gamma}) \bar{T}} \right), \quad (3)$$

где $\gamma_a = 0,98$ °С/100 м, – сухоадиабатический градиент температуры; \bar{T} , $\bar{\gamma}$ – соответственно температура и ее фактический вертикальный градиент, осредненные по изобарической поверхности.

Следует заметить, что такое применение вертикального градиента температуры в (3) или изэнтропических поверхностей в (1, 2) приводят к ограничениям использования формул в условиях стратификации близкой к равновесной или неустойчивой. В то же время для оценки энергии вертикальной неустойчивости, при обработке данных радиозондирования, в синоптической практике уже давно используют простой параметр, иногда обозначаемый как CAPE (Convective Available Potential Energy)

$$CAPE = g \int_{h_k}^{h_E} \frac{T_i - T_e}{T_e} dh, \quad (4)$$

где T_e – температура окружающей среды; T_i – температура адиабатически поднимающейся частицы; h_k и h_E – высоты нижней и верхней границ конвективно-неустойчивого слоя.

Несложно понять, что в основе всех вышеприведенных выражений заложена оценка неоднородности распределения плотности атмосферы в поле силы тяжести Земли, записанная через более удобные и прямо измеряемые параметры. Далее, во избежании путаницы в терминологии введем понятие *относительной потенциальной энергии* (ОПЭ), под которым будем понимать отклонение от средней потенциальной энергии рассматриваемого уровня. Исходя из определения работы силы плавучести, выразим ОПЭ через плотность среды ρ

$$ОПЭ_i = g \int_{h_z}^{h_E} \frac{\bar{\rho} - \rho_i}{\rho_i} dh. \quad (5)$$

С помощью уравнения состояния перейдем от плотности к потенциальной температуре и получим выражение, аналогичное CAPE, вполне удобное для применения в метрической системе вертикальных координат

$$ОПЭ_i = g \int_{h_z}^{h_E} \frac{\bar{p}T_i - p_i\bar{T}}{p_i\bar{T}} dh = g \int_{h_z}^{h_E} \frac{\theta_i - \bar{\theta}}{\bar{\theta}} dh, \quad (6)$$

где p – давление, T – температура, θ – потенциальная температура. Черта сверху означает осреднение по уровню $h_z + dh$, индекс i – характеристика частицы перемещающейся адиабатически с рассматриваемого уровня h_z до высоты выравнивания температур ($\theta_i = \bar{\theta}$) h_E .

ОПЭ не противоречит концепции ДПЭ, различаясь лишь в том, что первая допускает наличие отрицательного знака, тогда как их абсолютные значения будут тождественны. Поэтому допустимо применить интегральную запись, аналогичную (1)

$$ДПЭ = \iint_S \int_0^\infty |ОПЭ_i| dz dS = g \iint_S \int_{h_z}^{h_E} \left| \frac{\theta_i - \bar{\theta}}{\bar{\theta}} \right| dh dz dS. \quad (7)$$

Потенциальная температура позволяет учесть влияние горизонтальной неоднородности поля давления и температуры, как в (1) и (2), но, в отличие от этих выражений, формулы (6), (7) не имеют ограничений использования при любой стратификации атмосферы. Некоторую трудность здесь представляет лишь расчет выделения скрытого тепла в случае начала конденсации, необходимый для коррекции значения θ_i . Добавим, что имеется незначительное влияние на плотность воздуха водяного пара и водности облаков, которое может быть учтено через применение потенциальной виртуальной температуры. Схематический принцип расчета приведен на рис.1, где ОПЭ единичного объема представляется площадью между осредненной по региону кривой стратификации и кривой состояния частицы.

Выделение мезомасштабной составляющей ОПЭ из общей произведем путем применения *фильтра скользящего осреднения*, который ограничивает область расчета $\bar{\theta}$ заданным размером вокруг i -ой частицы (узла сетки). Порог данного фильтра определяет верхний предел масштаба рассматриваемых процессов (рис.2). Последовательность операции фильтрации и нахождения разности температур по своей сути аналогична вычислению лапласиана поля потенциальной температуры в некоторой разновидности конечно-разностного представления.

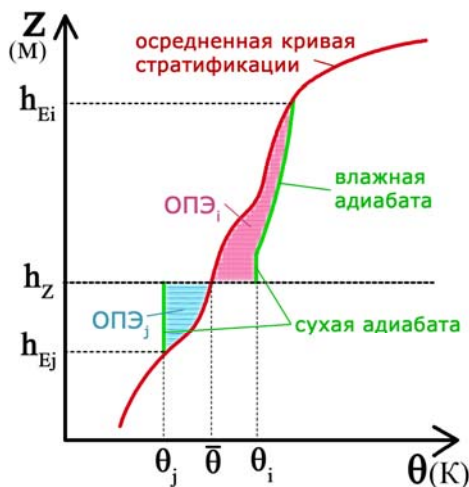


Рис.1 – Принцип расчета относительной потенциальной энергии.

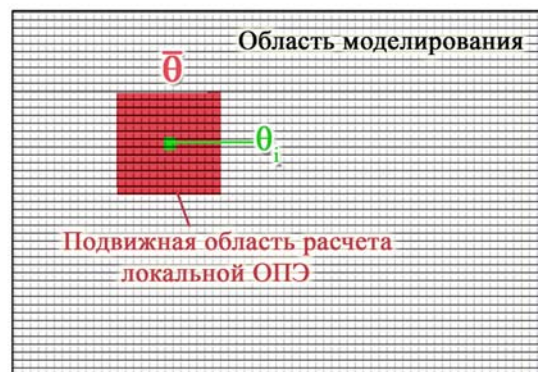


Рис.2 – Схема пространственного фильтра для расчета локальной относительной потенциальной энергии

Исходные данные. Расчет локальной ОПЭ стал возможен благодаря использованию регулярных данных высокого разрешения, полученных на выходе региональной модели атмосферы WRF-ARW v.2.2.1 [8], проходящей адаптацию в УкрНИГМИ. Пространственные характеристики исходных данных определялись параметрами расчетной области модели – 98×70 узлов сетки по горизонтали с разрешением около 30 км и 27 неравномерных уровней по вертикали, от сотен метров в пограничном слое до более километра в верхней тропосфере. Положение и размер расчетной области показаны на рис.3. В исследовании использовались трехмерные поля метеорологических величин: температуры, влажности, давления и составляющие скорости ветра. Начальными и граничными условиями моделирования послужили прогностические поля GFS.

Результаты исследования и их анализ. Расчет ОПЭ и ДПЭ выполнен для нескольких синоптических ситуаций прохождения ярко выраженных холодных атмосферных фронтов в зимнее полугодие, при отсутствии явных признаков конвекции:

- 1) 23 ноября 2008 г. циклон образовался над территорией Румынии и перемещался на северо-восток через Украину. Прохождение циклона сопровождалось интенсивными осадками и сильным ветром, быстрым падением давления в его центре. Холодный фронт имел очень большие градиенты температуры (до 10 °С на 100 км).
- 2) 8 января 2009 г. атмосферный фронт, вместе с углубляющейся барической ложбиной, сместился на территорию Украины с северо-запада. В поле температуры холодный фронт был хорошо выражен на высотах и хуже у поверхности земли.
- 3) 17 января 2009 г. синоптическая ситуация определялась малоподвижным неглубоким циклоном, возникшем на юге страны благодаря вторжению холодной воздушной массы. Более подробное описание синоптических ситуаций, конфигурации модели и верификации проведенных симуляций можно найти в [9].

Интегрирование выражения (6) произведено с заданной дискретностью в 10м, что важно для определения высоты выравнивания температуры и достигается применением кубической интерполяции между уровнями модели.

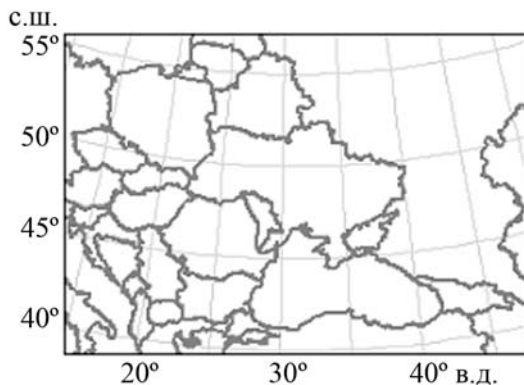


Рис.3 – Расчетная область модели [10].

Анализируя полученные результаты, будем использовать именно ОПЭ, как более информативную характеристику количественно равную ДПЭ. Рассмотрим ее пространственное распределение, когда холодный атмосферный фронт наилучшим образом прослеживался в полях осадков, облачности, температуры и ветра (рис.4).

Согласно определению и выражению (6) ОПЭ характеризует величину отклонения от устойчивого равновесного состояния рассматриваемой системы, поэтому её поля имеют как отрицательные, так и положительные значения. Отрицательные значения соответствуют холодным воздушным массам, затекающим в тыл циклонам и стремящимся опуститься вниз. Положительные значения наоборот – теплomu воздуху, стремящемуся подняться вверх для перехода системы в устойчивое состояние. На вертикальных разрезах видно, что максимальные значения отрицательной ОПЭ расположены на высоте 4–5 км, в то время как положительная ОПЭ сосредоточена ближе к поверхности земли.

В соответствии с расчетными выражениями горизонтальный перепад давления должен приносить положительную добавку ОПЭ в циклоне и отрицательную в

антициклоне. Поскольку не наблюдается четкого соответствия гребней ОПЭ центрам циклонов и оси ложбины, то, очевидно, что вклад барического фактора оказывается значительно меньшим в сравнении с влиянием термической неоднородности и стратификации, даже в хорошо развитом циклоне 23 ноября 2008 г.

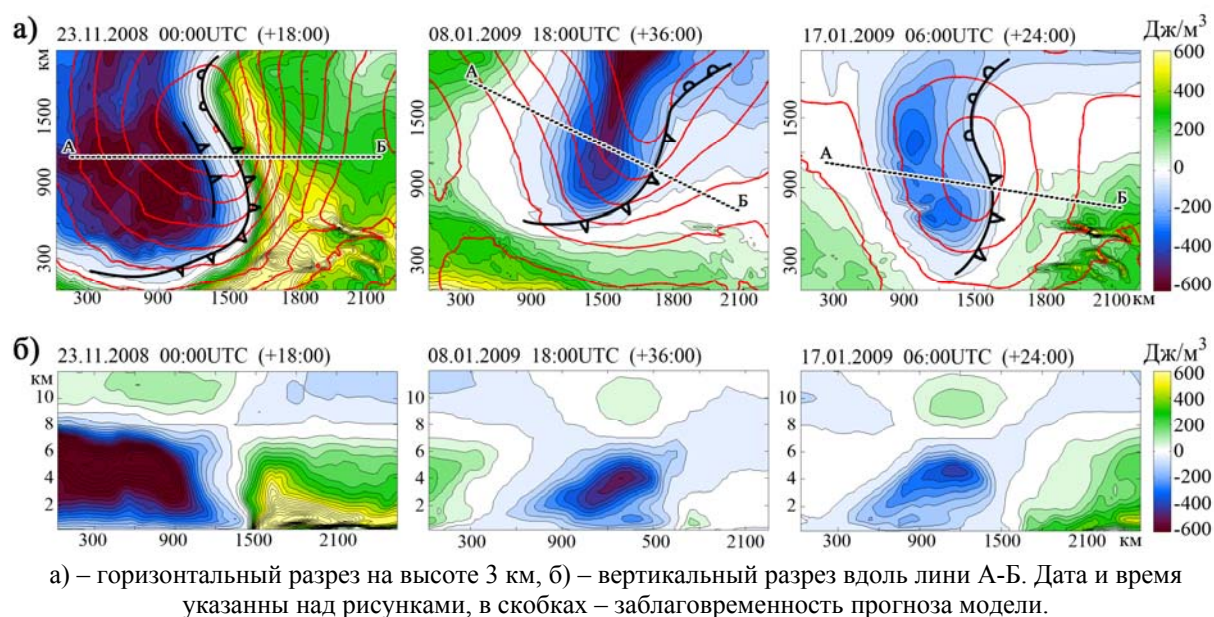
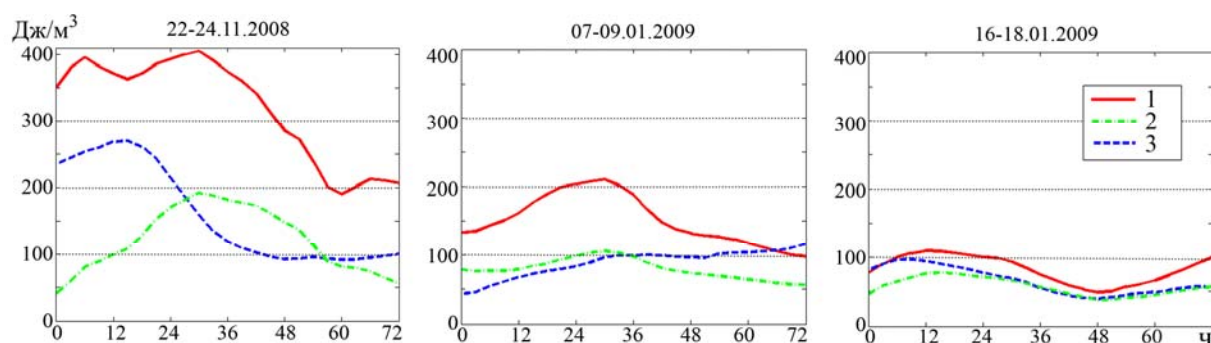


Рис.4 – Относительная потенциальная энергия расчетного домена (заливка) и поле давления (жирные изолинии, проведены через 5 гПа).

На рис.5 показан временной ход значений ОПЭ, осредненных по всему объему расчетной области, позволяющий сопоставить вклад положительной, отрицательной частей, а так же конденсации в среднюю ДПЭ системы. Обращает внимание трехкратное различие средних значений ОПЭ между первым и последним случаем, несмотря на то, что развитие циклонов происходило во всех выбранных ситуациях. Однако необходимо отметить, что случай 22 ноября 2008 г. следует относить к исключительно сильному циклогенезу в рассматриваемом регионе [9].



1 – положительная ОПЭ, 2 – положительная ОПЭ без учета конденсации, 3 – отрицательная ОПЭ.
Ось абсцисс – время с момента инициализации модели (время прогноза).

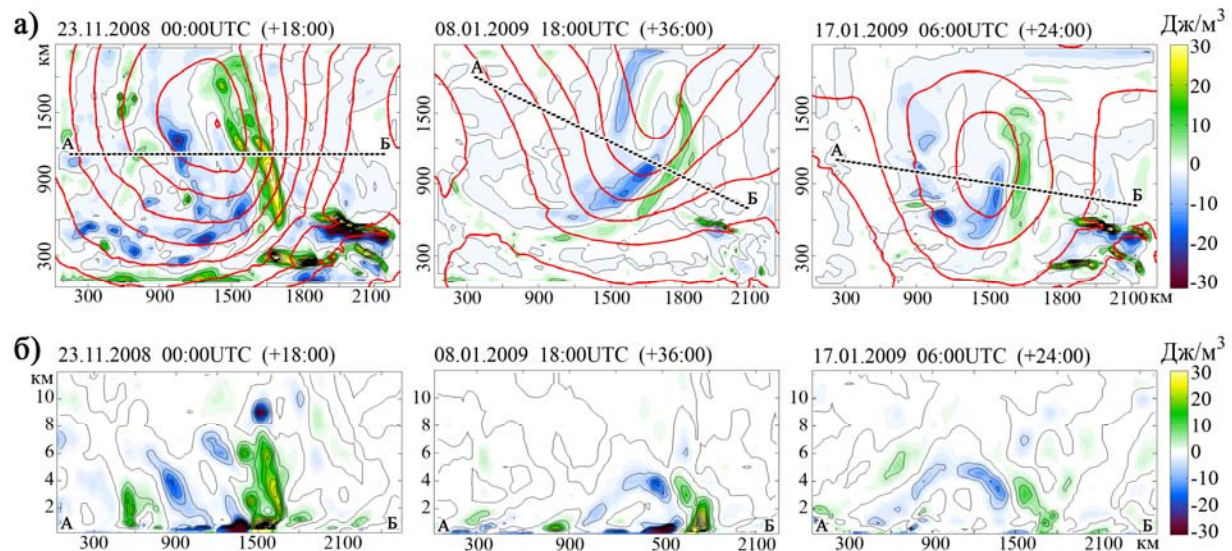
Рис.5 – Временной ход составляющих ОПЭ, осредненной по расчетной области.

Значения средней положительной ОПЭ практически всегда больше отрицательной, иногда превышая последнюю в два раза. Исключая из расчета конденсацию влаги, получаем примерно одинаковые модули значений положительной и отрицательной ОПЭ. Такое сопоставление позволяет наглядно оценить роль

влажности в генерации ДПЭ. Основной механизм её влияния нелинейный и сводится к уменьшению устойчивости стратификации атмосферы за счет выделения скрытого тепла в случае начала конденсации при подъеме воздушной массы.

Размеры модельного домена, в пределах которого произведен расчет, сопоставимы с масштабами синоптических процессов, для которых высвобождение и генерация ДПЭ тесно взаимосвязаны с глобальной циркуляцией и регулируется, в том числе, эффектом Кориолиса. Поэтому на этом масштабе процесс перехода энергии протекает сравнительно медленно и далеко не вся она успевает осуществить преобразование за время жизненного цикла синоптических объектов. В какой-то мере это связано с тем, что ДПЭ не является собственной характеристикой воздушной массы, а определяется отношением плотностей и стратификацией взаимодействующих воздушных масс, произвольным выбором масштаба рассмотрения. С уменьшением масштаба скорость и эффективность реализации ДПЭ должна возрастать.

Атмосферные фронты нередко вытянуты на тысячи километров в длину, но в поперечном сечении имеют ширину порядка сотен километров, от чего их можно рассматривать и как мезомасштабные системы. Попробуем оценить их ДПЭ именно в таком масштабе. Для этого, применив фильтрацию, рассчитаем отклонения от среднего по меньшей территории, отсеивая крупномасштабный вклад. Порог фильтра выберем сопоставимым с поперечным сечением фронтальной зоны – около 400 км. Полученные поля локальной ОПЭ выявляют как фронтальные, так и внутримассовые очаги неустойчивости (рис.6). Вытянутые вдоль холодных фронтов зоны положительной ОПЭ формируются, по-видимому, за счет выделения скрытого тепла, так как хорошо совпадают с зонами осадков, тогда как отрицательные возникают, вероятно, в том числе за счет испарения осадков и фронтальной облачности в более сухом холодном воздухе за фронтом.



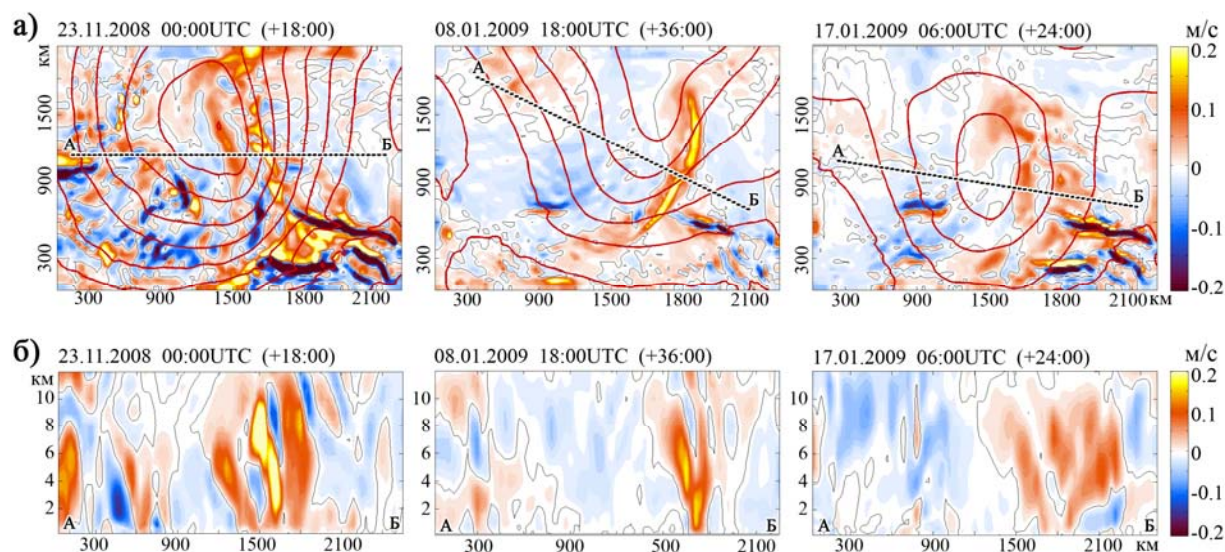
а) – горизонтальный разрез на высоте 3 км, б) – вертикальный разрез вдоль А-Б.

Рис.6 – Локальная относительная потенциальная энергия (заливка) и поле давления (жирные изолинии, проведены через 5 гПа).

Несмотря на то, что значения данной мезомасштабной ОПЭ на порядок меньше величин рассчитанных по всему полигону, эта часть энергии, должна быть более доступной и реализовываться в первую очередь. Она ответственна за развитие восходящих мезомасштабных (конвективных) движений в холодном воздухе, который в синоптическом масштабе все же стремится опуститься вниз. На вертикальных

разрезах локальной ОПЭ также видно, что основные положительные очаги расположены несколько ниже отрицательных.

Для косвенной проверки теории и методики расчета сопоставим поля локальной ОПЭ и вертикальных токов, представленных на рис.7. Видно преобладающее совпадение знака ОПЭ с направлением вертикальных токов, что может служить обоснованием физической верности реализованной методики и ее пригодности для анализа атмосферных процессов. Однако, зоны положительной ОПЭ более однозначно связаны с областями восходящих движений, чем отрицательные с нисходящими. Локализованные очаги нисходящих токов в полях вертикальной составляющей скорости практически отсутствуют, а очаги восходящих движений, при детальном рассмотрении, оказываются немного смещенными относительно зон положительной локальной ОПЭ.



а) – горизонтальный разрез на высоте 3 км, б) – вертикальный разрез вдоль А-Б.

Рис.7 – Вертикальная составляющая скорости ветра (заливка) и поле давления (жирные изолинии, проведены через 5 гПа).

С другой стороны, тесной количественной зависимости между ОПЭ и вертикальными токами и вертикальными ускорениями быть не должно по двум причинам: во-первых, ОПЭ не является собственной характеристикой объема воздуха, а определяется состоянием окружающей его среды; и, во-вторых, мезомасштабные возмущения получают кинетическую энергию, в том числе, и от крупномасштабного потока, что, естественно, отражается в процессах генерации и реализации ОПЭ (или ДПЭ), но с некоторым сдвигом фазы во времени.

Выводы. В рассмотренных синоптических ситуациях обострения холодных атмосферных фронтов, воссозданных при помощи регионального моделирования, горизонтальное распределение ДПЭ определяется главным образом распределением температуры. Основная часть положительной ОПЭ сосредоточена в нижних слоях, тогда как отрицательная ОПЭ имеет максимум в средней части тропосферы. Роль вертикальной стратификации сводится к регулированию тенденции заданной горизонтальным распределением потенциальной температуры и существенна даже в холодное полугодие.

Значения средней положительной и отрицательной ОПЭ сухой атмосферы приблизительно равны, а конденсация влаги может увеличить значение первой в два раза и более, несмотря на преобладание устойчивой вертикальной стратификации.

ДПЭ мезомасштабных процессов (мезо- α , до 400 км) на порядок меньше синоптических, однако ее реализация происходит быстрее и, по-видимому, эффективнее. Поля локальной ОПЭ в общих чертах удовлетворяют распределению вертикальных токов и классическим представлениям о таковых во фронтальных зонах, но без учета динамики среды данная характеристика не позволяет с достаточной точностью описать мезомасштабные процессы α -диапазона. Поэтому в перспективе работы планируется проведение дополнительного исследования изменения кинетической энергии атмосферы.

Список литературы

1. *Smith P.J. and Dare P.M.* The kinetic and available potential energy budget of a winter extratropical cyclone system // *Tellus*. – 1986. – Vol. 38A, No. 1. – P. 49–59.
2. *Калинин Н.А.* Исследование доступной потенциальной энергии циклонов умеренных широт // *Метеорология и гидрология*. – 1997. – № 1. – С. 37–49.
3. *Калинин Н.А.* Энергетика циклонов умеренных широт. – Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1999. – 192с.
4. *Ван Мугем Ж.* Энергетика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 328 с.
5. *Lorenz E.N.* Available potential energy and the maintenance of the general circulation // *Tellus*. – 1955. – Vol. 7. – P. 157–167.
6. *Лоренц Э.Н.* Природа и теория общей циркуляции атмосферы: Пер. с англ. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 259 с.
7. *Ветров А.Л.* Генерация доступной потенциальной энергии вследствие фазовых переходов водяного пара в циклонах умеренных широт // Автореф. дис. канд. геогр. наук. – Пермь, 2003. – 19 с.
8. *Skamarock W.C., Clemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Wang W., Powers J.G.* A description of the Advanced Research WRF Version 2 // *NCAR Technical Note*. – 2005. – NCAR/TN-468+STR. – 88 p.
9. *Ивус Г.П., Пишняк Д.В., Шпиг В.М.* Оценка восстановления состояния атмосферы при прохождении холодных фронтов в модели WRF ARW // *Вісник Одеського державного екологічного ун-та*. – 2010. – № 9. – С. 92–102.
10. Регіональні метеорологічні моделі в УкрНДГМІ. – WEB ресурс // <http://water-ecobase.org.ua/>

Розрахунок доступної потенційної енергії на основі даних регіональної моделі атмосфери WRF-ARW. Пішняк Д.В., Івус Г.П., Шпиг В.М., Будак І. В.

Виконана адаптація розрахункової формули доступної потенційної енергії (ДПЕ) для застосування до даних регіонального моделювання атмосфери з високим просторовим розділенням. Для декількох випадків загострених холодних атмосферних фронтів отримано розподіл загальної по області та локальної мезомасштабної ДПЕ.

Ключові слова: відносна потенційна енергія, енергія нестійкості, енергія фазових переходів, ізентропічна поверхня, атмосферний фронт.

Calculation of available potential energy based on mesoscale atmospheric model WRF-ARW data.

Pishniak D.V., Ivus G.P., Shpyg V.M., Budak I.V.

The design formula for available potential energy (APE) is adapted for high resolution data of regional atmosphere modeling. For several cases of severe cold front passing the distribution of total about area and local mesoscale APE is obtained.

Key words: relative potential energy, energy of instability, latent energy, isentropic surface, atmospheric front.