

МЕТЕОРОЛОГИЯ

УДК 551.511.33:551.521.31(470.53)

Н.А. Калинин, И.Л. Лукин**ГЕНЕРАЦИЯ ДОСТУПНОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ВСЛЕДСТВИЕ ПРИТОКА
КОРОТКОВОЛНОВОЙ РАДИАЦИИ ПО ДАННЫМ МОДЕЛИ WRF**

Проведено исследование особенностей распределения генерации доступной потенциальной энергии (ДПЭ) вследствие притока коротковолновой радиации. В качестве базовых значений полей для расчета генерации доступной потенциальной энергии использовались данные счета мезомасштабной модели WRF (Weather Research and Forecasting), полученные в Пермском государственном национальном исследовательском университете. Полученные результаты свидетельствуют о влиянии высоты солнца, облачности и массовой доли водяного пара на генерацию ДПЭ вследствие притока коротковолновой радиации.

К л ю ч е в ы е с л о в а: доступная потенциальная энергия, коротковолновая радиация, модель WRF, водяной пар, облачность.

Введение

Проблема энергетики атмосферы является одной из важных и актуальных в метеорологии. Распределение источников и стоков энергии, её 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 [1; 3; 5; 6; 11].

Энергетический подход в изучении атмосферы обеспечивает единую шкалу при количественной оценке вклада изучаемых процессов в развитие общей циркуляции атмосферы, позволяет глубже понять механизмы этого развития и его прогнозирования, а также является важным этапом в разработке способов активного воздействия на атмосферные процессы [1; 4; 5; 9; 12; 13; 16].

Доступная потенциальная энергия (ДПЭ) атмосферы определяется как разность между полной потенциальной энергией и энергией в устойчивом гидростатическом равновесии. Она представляет собой ту часть полной потенциальной энергии, которая может быть преобразована в кинетическую энергию в рассматриваемой замкнутой системе [6; 7; 13].

Целью данной работы, в которой развиваются начатые нами ранее исследования о генерации ДПЭ за счет радиационных притоков тепла, является рассмотрение генерации ДПЭ вследствие притока коротковолновой радиации над территорией Пермского края и прилегающих регионов.

Исходные данные и методика расчётов

Для расчета генерации доступной потенциальной энергии вследствие притоков коротковолновой радиации использовались поля метеорологических величин, полученных с помощью модели WRF.

Во всем мире в гидрометеорологических службах используются численные модели прогноза погоды для прогнозирования детальных распределений метеорологических элементов (скорости и направления ветра, осадков и др.) во времени и пространстве. Эти модели используются не только для прогнозирования погоды, но и для принятия решений в различных отраслях, таких как авиация, реагирование на стихийные бедствия и др. [8; 10].

Модель WRF (Weather Research and Forecasting, Исследования и Прогнозирование Погоды) является мезомасштабной численной моделью, созданной с целью обеспечения потребностей как в оперативном прогнозировании, так и в исследовании атмосферы. Разработка модели WRF велась коллективно, в основном NCAR, NOAA (в составе NCEP), FSL (Forecast Systems Laboratory), AFWA

© Калинин Н.А., Лукин И.Л., 2015

Калинин Николай Александрович, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета; Россия 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; kalinin@psu.ru

Лукин Илья Леонидович, инженер кафедры метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета; Россия 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; gdytche@gmail.com

(Air Force Weather Agency), Naval Research Laboratory, Oklahoma University и FAA (Federal Aviation Administration).

В трехмерной численной метеорологической модели WRF численно решается полная система уравнений гидротермодинамики атмосферы, которая включает в себя уравнения неразрывности, переноса импульса (с учетом эффектов сжимаемости и негидростатичности), переноса влаги и внутренней энергии. Пользователю модели предлагается библиотека различных параметризаций процессов в пограничном слое атмосферы, формирования облачности и осадков. В модели реализованы возможности создания вложенных вычислительных областей с использованием алгоритмов усвоения данных наблюдений. В WRF используется σ -система вертикальных координат, которая позволяет описывать сложный рельеф, и «шахматная» сетка по горизонтали.

При интегрировании уравнений гидродинамики используется расщепление по направлениям (в горизонтальных направлениях используется явная схема, а при вычислении вертикальных потоков и скоростей – неявная) и по физическим процессам. WRF является региональной моделью, поэтому для ее инициализации и задания граничных условий необходимы результаты расчетов глобальной модели численного прогноза погоды. Цикл работы модели WRF состоит из подготовки данных, включая их горизонтальную и вертикальную интерполяцию на сетку модели, улучшение интерполированных данных с помощью усвоения наблюдений метеостанций и радиозондов и численное интегрирование [18–20].

В Пермском государственном национальном исследовательском университете были рассчитаны метеорологические величины и получены бинарные файлы с информацией об их распределении на полигоне 199x199 точек с шагом 10x10 км на 19 изобарических поверхностях (от 1000 гПа до 100 гПа через 50 гПа) в пределах области между 45–65° с. ш. и 45–82° в. д., полностью покрывающей Пермский край и сопредельные территории, в моменты времени от 0 ч. до 48 ч. (17 срезов по времени через каждые 3 ч.). Также в файлы записывалась информация и о географических координатах точек полигона.

С помощью разработанной в университете программы «Чтение бинарных данных .dat» из общего файла изымались распределения величин, необходимых для расчета генерации доступной потенциальной энергии за счет коротковолновой радиации (температура воздуха (K), массовая доля водяного пара ($кг/кг$), высота изобарической поверхности, альbedo подстилающей поверхности, географические координаты каждой из точек полигона).

Для расчетов, анализа и представления результатов было выбрано следующее программное обеспечение:

1) Microsoft Visual Studio 2010 express edition – в связи с тем, что является бесплатной и достаточно удобной [17].

2) Чтение бинарных данных .dat — данная программа позволяет извлекать необходимые данные из бинарных файлов выходной информации модели.

3) Isograph — удобное и достаточно качественное средство отображения информации [15].

В среде Microsoft Visual Studio 2010 на языке C# была написана программа, позволяющая производить следующие расчеты:

1. По исходной температуре:

1.1. Давление насыщенного водяного пара над поверхностью воды по формуле Магнуса

$$E = 6,11 * 10^{\frac{7,63t}{241,9+t}} \quad (1)$$

1.2. Средняя температура:

$$\overline{T_{a,b}} = \frac{\sum_{i=a-14}^{a+14} \sum_{j=b-14}^{b+14} t_{i,j}}{N} + 273,15, \quad (2)$$

где i и j могут принимать значения только от 1 до 185; N – количество таких точек.

1.3. Дисперсии температуры:

$$\sigma_{T_{a,b}}^2 = \frac{\sum_{i=a-14}^{a+14} \sum_{j=b-14}^{b+14} [t_{i,j} + 273,15 - \overline{T_{a,b}}]^2}{N}, \quad (3)$$

где i и j могут принимать значения только от 1 до 185; N – количество таких точек.

1.4. Коэффициенты для расчёта N :

$$k_{i,j+1} = 0,25 * \left(\frac{\sigma_{T_i}^2}{T_i^2} + \frac{\sigma_{T_{i+1}}^2}{T_{i+1}^2} \right), \quad (4)$$

где i – номер изобарической поверхности.

2. По исходной массовой доле водяного пара r :

2.1. Парциальное давление водяного пара e , гПа:

$$e = \frac{p * r}{0,622 + r}. \quad (5)$$

2.2. Эффективные поглощающие массы m воды и углекислого газа методом трапеций, кг/м²:

$$m = \frac{1}{2g} \sum_{k=i+1}^l \left[q_{k-1} \left(\frac{p_{k-1}}{p_0} \right) + q_k \left(\frac{p_k}{p_0} \right) \right] (p_k - p_{k-1}), \quad (6)$$

где $i=0, 1, \dots, l-1$ – номера изобарических поверхностей, отсчитываемые сверху вниз; $p_0 \approx 1000$ гПа [4].

3. По значениям широты и долготы рассчитываются зенитные углы Солнца по формуле

$$\cos \Theta = \sin \varphi \sin \delta - \cos \varphi \cos \delta \cos \left(\frac{2\pi}{\Pi} (((t-1)*3-12)*3600 + \lambda * 240) \right), \quad (7)$$

где φ – широта места; λ – долгота места; δ – склонение Солнца; $\Pi = 86400$ с – длина суток; t – время, для которого производится расчёт, с [14].

4. Анализ облачности по критерию Дж. Смагоринского.

Рассчитываются значения относительной влажности воздуха:

$$f = \frac{e}{E}. \quad (8)$$

Слой в атмосфере будет считаться облачным при выполнении условия

$$f > f_{кр},$$

где f – значение относительной влажности в слое; $f_{кр}$ – критическое значение относительной влажности для различных высот в атмосфере:

$f_{кр} = 0,8$ при $p = 950-800$ гПа (облака нижнего яруса);

$f_{кр} = 0,7$ при $p = 800-500$ гПа (облака среднего яруса);

$f_{кр} = 0,6$ при $p = 500-300$ гПа (облака верхнего яруса).

При этом находятся только самый верхний и самый нижний облачные слои (если они есть), пространство между верхним и нижним слоями считается облачным [2].

5. Восходящие и нисходящие потоки коротковолновой радиации для различных категорий атмосферы, Вт/м²

Безоблачная атмосфера. Выражения для коротковолновых радиационных потоков получаются в результате интегрирования уравнений переноса коротковолновой радиации. Прямая солнечная радиация на единичную горизонтальную поверхность определяется следующим образом:

$$S'(z) = S_0 \cos \Theta P_{k_1}(m_1 m_{c_1}). \quad (9)$$

Нисходящая рассеянная радиация отсутствует, т.е. $D^\downarrow(z) = 0$, а отражённая радиация определяется по формуле

$$D^\uparrow(z) = S_0 \cos \Theta P_{k_2}(m_2 m_{c_2}). \quad (10)$$

Здесь $S_0 \cos \Theta$ – инсоляция на верхней границе атмосферы, $S_0 = 1376$ Вт/м² – солнечная постоянная. Буквы P и m с индексами обозначают функции пропускания и поглощающие массы для разных видов радиации.

Подоблачный слой. Прямая радиация отсутствует, нисходящая и восходящая радиации рассчитываются по формулам

$$D^{\downarrow}(z) = S_0 \cos \Theta P_{k3}(m_3 m_{c3}), \quad (11)$$

$$D^{\uparrow}(z) = S_0 \cos \Theta P_{k5}(m_4 m_{c4}). \quad (12)$$

Надоблачный слой. Поток прямой солнечной радиации $S'(z)$ определяется так же, как и в безоблачной атмосфере: $D^{\downarrow}(z) = 0$.

Восходящая радиация равна сумме потоков, отражённых подстилающей поверхностью и облаками:

$$D^{\uparrow}(z) = S_0 \cos \Theta [P_{k5}(m_4 m_{c4}) + P_{k4}(m_5 m_{c5})]. \quad (13)$$

В спектре солнечной радиации, достигающей земной поверхности, выделяют ближний ультрафиолетовый (0,3–0,39 мкм), видимый (0,39–0,76 мкм) и ближний инфракрасный (0,76–5 мкм) участки спектра. Причём для первых двух диапазонов земная атмосфера практически прозрачна. Расчёты показывают, что интегральная функция пропускания в ближней инфракрасной области спектра зависит в основном от массы водяного пара. Поглощение другими газами (CO_2 , O_2 , O_3) уменьшает интегральную функцию пропускания на 1–3%, причём это уменьшение практически обусловлено углекислым газом. Поглощение озоном и кислородом пренебрежимо мало.

Интегральная функция пропускания для коротковолновой радиации в облачной атмосфере P_{ki} ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) может быть представлена в следующем виде:

$$P_{ki}(m_j m_{cj}) = \alpha_i P_{uk}(m_j m_{cj}), \quad (14)$$

где $P_{uk}(m_j m_{cj})$ – функция пропускания для инфракрасной части солнечной радиации, учитывающая поглощение радиации водяным паром и углекислым газом.

Аналитическое выражение интегральной функции пропускания в близкой инфракрасной области спектра имеет следующий вид:

$$P_{uk}(m_j m_{cj}) = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i \exp(-c_i \sqrt{m_j}) - 0,012(m_{cj})^{0,15}, \quad (15)$$

где m_j и m_{cj} – соответственно поглощающие массы водяного пара и углекислого газа, $\text{кг}/\text{м}^2$; $b_0=0,15$; $b_1=0,7$; $b_2=0,13$; $b_3=0,02$; $c_1=0,0342$; $c_2=0,54$; $c_3=2,0$.

Коэффициент α_1 учитывает отражение и пропускание солнечной радиации облаками и отражение её земной поверхностью в инфракрасной области спектра. Для прямой солнечной радиации $\alpha_1=1$.

Коэффициент $\alpha_2=A$, где A – интегральное альbedo подстилающей поверхности.

Коэффициент α_3 представляет собой долю радиации, пропущенной облаками.

Коэффициент α_4 представляет собой альbedo облаков.

Коэффициент $\alpha_5 = \alpha_2 \cdot \alpha_3$ характеризует ослабление инфракрасной радиации в результате прохождения её сквозь облако и отражения от подстилающей поверхности [4].

Способы расчёта эффективных поглощающих масс различны для различных видов коротковолновой радиации (рис. 1).

Для прямой солнечной радиации:

$$m_j = m_{cj} = m_1 = m_{c1} = m \sec \Theta. \quad (16)$$

Для радиации, отражённой от земли (при ясном небе):

$$m_j = m_{cj} = m_2 = m_{c2} = M \sec \Theta. \quad (17)$$

Для радиации, пропущенной облаком:

$$m_j = m_{cj} = m_3 = m_{c3} = m_{BO} \sec \Theta + (m - m_{BO}) \overline{\sec \Theta}. \quad (18)$$

Для радиации, отражённой от земли (при пасмурном небе):

$$m_j = m_{cj} = m_4 = m_{c4} = m_{BO} \sec \Theta + (M - m_{BO}) \overline{\sec \Theta}. \quad (19)$$

Для радиации, отражённой от облака:

$$m_j = m_{cj} = m_5 = m_{c5} = m_{BO} \sec \Theta. \quad (20)$$

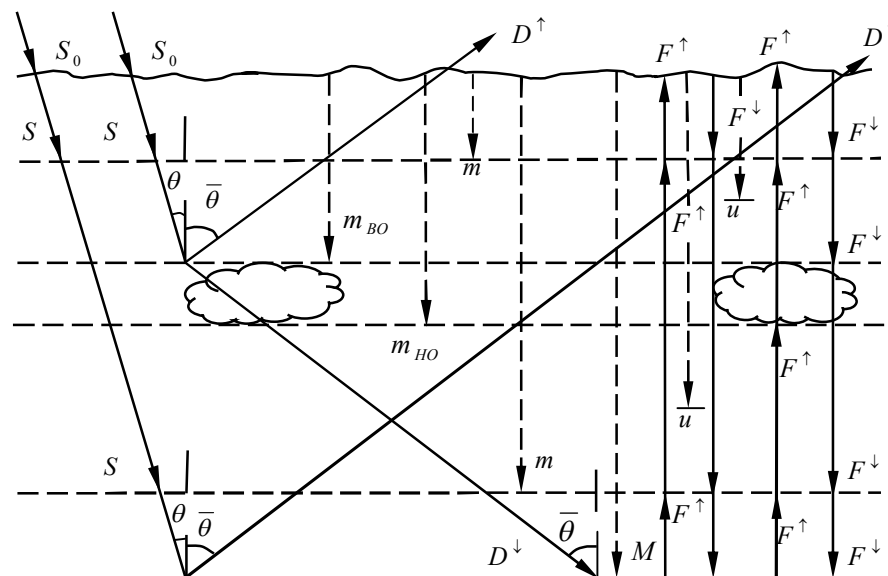


Рис. 1. Схема распространения лучистых потоков и эффективных поглощающих масс на пути луча для различных видов радиации

Здесь $\overline{\sec \Theta} = 1,66$ – средний секанс угла, под которым распространяются отражённые или прошедшие сквозь облако лучи; M – эффективная поглощающая масса всего атмосферного столба; m_{BO} – эффективная поглощающая масса надоблачного слоя; m – эффективная поглощающая масса водяного пара или углекислого газа, которая вычисляется методом трапеций ($кг/м^2$) по формуле (6) [4].

6. Вычисление генерации ДПЭ:

6.1. Расчет коэффициента эффективности ДПЭ:

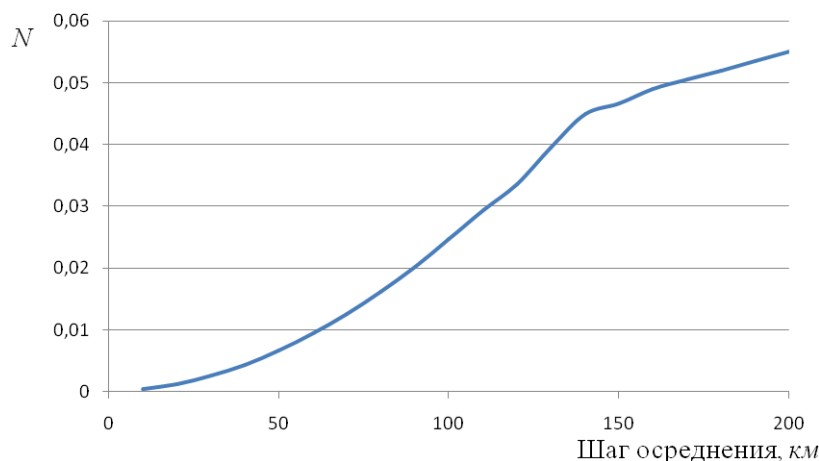
При расчете составляющих уравнения баланса доступной потенциальной энергии наиболее сложным является вопрос о методике определения коэффициента эффективности N , который характеризует интенсивность генерации ДПЭ за счет неадиабатических источников тепла (в нашем случае коротковолновая радиация). В данной работе коэффициент эффективности рассчитывался по формуле

$$N = \frac{1}{2} \left[\frac{\gamma_a \sigma_T^2}{(\gamma_a - \gamma) \bar{T}^2} \right], \quad (21)$$

которая является следствием аппроксимации ДПЭ, предложенной Э.Н. Лоренцом [4; 3]. Здесь γ_a — сухоадиабатический градиент; σ_T^2 — взвешенное значение дисперсии температуры воздуха на изобарической поверхности; γ — вертикальный градиент температуры воздуха. Необходимо отметить, что N для полигона будет отличаться от N , введенной Э.Н. Лоренцом [13], на величину, пропорциональную квадрату разности между средней температурой по площади полигона и средней температурой по Земному шару для выделенного столба атмосферы [4].

Анализируя (21), мы сталкиваемся с проблемой выбора области осреднения и вычисления дисперсии температуры. Проблема связана с тем, что точки поля расположены достаточно близко друг к другу (на расстоянии 10 км), в результате чего изменения температуры выражаются в сотых долях °С, а коэффициенты эффективности, вычисленные с шагом 10 км, будут принимать крайне малые значения и оказываются вычисленными с большой погрешностью. Зависимость коэффициента эффективности ДПЭ от шага осреднения представлена на рис. 2.

Вместе с тем увеличение шага осреднения приводит к тому, что коэффициенты N перестают отражать особенности конкретной местности и явления мезомасштаба, кроме того, при вычислении N по данным полей gr1b минимальный шаг сетки составляет 1,5°. Принимая это во внимание, а также излом графика и изменение экспоненциального увеличения на линейное, было принято решение считать коэффициент N с шагом 140 км.

Рис. 2. Зависимость коэффициента эффективности N от шага осреднения, км.

6.2. Вычисление удельного притока тепла, обусловленного коротковолновой радиацией, $Вт/кг$:

$$\varepsilon_{rad} = g \frac{\Delta F}{\Delta p}. \quad (22)$$

6.3. Рассчитывается генерация доступной потенциальной энергии вследствие притоков коротковолновой радиации, $Вт/м^2$:

$$G_{rad} = \frac{1}{g} \int_p^{p_2} N \varepsilon_{rad} dp. \quad (23)$$

Вычисление генерации производится послойно в слоях по 50 гПа от 1000 гПа до 100 гПа, данные записываются в файлы, таким образом, на выходе мы имеем 18 файлов, содержащих информацию о генерации ДПЭ вследствие притоков коротковолновой радиации в точках полигона в 18 слоях атмосферы [4; 3].

Анализ генерации доступной потенциальной энергии

Суточный ход генерации ДПЭ. Базовые значения полей, необходимые для расчета генерации доступной потенциальной энергии вследствие притока коротковолновой радиации, мезомасштабная модель WRF выдавала с интервалом в 3 часа. Для исследования суточного хода были получены поля суммарной генерации ДПЭ во всей толще атмосферы за каждый срок с 4 по 10 июля 2009 г., после чего отбирались максимальные, минимальные значения, осреднялись величины генерации за каждый из 8 сроков по всей площади полигона. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Средние, максимальные и минимальные значения генерации ДПЭ вследствие притоков коротковолновой радиации, $Вт/м^2$

Срок МСВ, ч	Генерация ДПЭ		
	максимальная	минимальная	средняя
0	7,6	0,0	0,3
3	34,5	0,1	1,4
6	92,3	0,2	3,9
9	98,0	0,2	5,9
12	88,6	0,1	4,4
15	17,7	0,0	1,3
18	1,1	0,0	0,1
21	0,00	0,0	0,0

Суммарная во всей толще атмосферы генерация ДПЭ изменяется в довольно широких пределах: от 0,0 до 98,0 $Вт/м^2$. Вместе с тем осреднённые по площади значения изменяются в довольно узких пределах: от 0,0 до 5,9 $Вт/м^2$, минимальные же от 0,0 до 0,2 $Вт/м^2$. Таким образом, существуют отдельные очаги генерации, хотя в основной части полигона она незначительна. Отрицательных

значений не наблюдается, что свидетельствует о том, что ДПЭ может только генерироваться за счёт притоков коротковолновой радиации, а атмосфера коротковолновую радиацию не излучает (выбранная методика не предусматривает коротковолновое излучение атмосферы, которое пренебрежимо мало).

Центральная часть исследуемой области лежит в районе меридиана 60° в.д., поэтому истинный полдень для всего полигона в целом стремится к 9 ч ВСВ. Как видно из табл. 1, именно в 9 ч ВСВ наблюдаются максимальные и наибольшие средние значения генерации (истинный полдень данной территории), и, наоборот, при полном отсутствии Солнца, генерации не наблюдается. Таким образом, прослеживается прямая зависимость от высоты Солнца.

Вертикальное распределение генерации ДПЭ. Генерация ДПЭ вычислялась в 18 слоях атмосферы, что даёт возможность исследовать ее вертикальный профиль. Для анализа вертикального распределения значения осреднялись для каждого уровня по всем срокам с 4 по 10 июля 2009 г.; был построен вертикальный профиль генерации ДПЭ (рис 3).

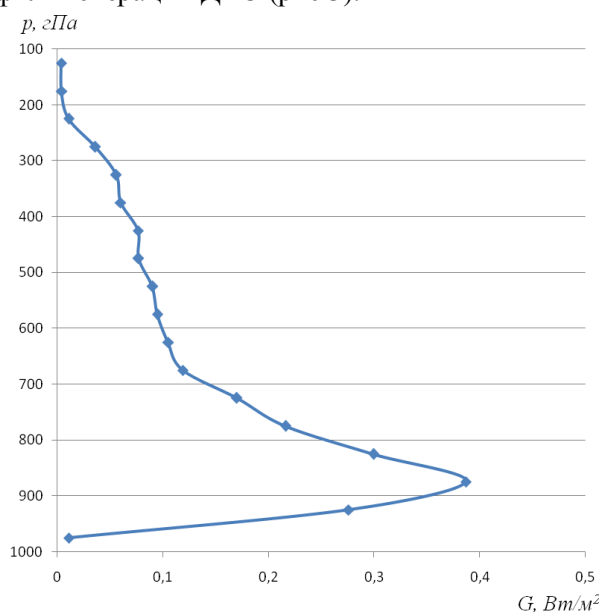


Рис. 3. Вертикальный профиль генерации ДПЭ (G) вследствие притоков коротковолновой радиации (Bm/m^2) для слоев атмосферы равной массы по 50 $гПа$ и осредненной по площади полигона

Анализируя рис. 3, можно сделать вывод о том, что максимальных значений генерация ДПЭ достигает в слое атмосферы 900–850 $гПа$ ($0,4 Bm/m^2$), затем значения довольно резко падают и в слое 700–650 $гПа$ составляют около $0,1 Bm/m^2$, после чего достаточно плавно убывают практически до нуля в верхних слоях. Также крайне малые осреднённые значения наблюдаются в слое 1000–950 $гПа$.

Такое распределение объясняется двумя основными факторами:

- 1) облачностью;
- 2) особенностью вертикального распределения поглощающих коротковолновую радиацию масс.

Облака нижнего яруса и вертикального развития наблюдаются летом наиболее часто (в данной работе исследовались только летние сроки) и увеличивают притоки коротковолновой радиации.

Поглощающие массы водяного пара и углекислого газа увеличиваются от верхних слоёв атмосферы к нижним, что приводит к росту притока коротковолновой радиации в этих слоях.

Малые значения генерации ДПЭ в слое 1000–950 $гПа$ объясняются тем, что данный слой в атмосфере фиксируется редко (изобарические поверхности, особенно 1000 $гПа$, довольно часто уходят «под землю», в таких случаях генерация не рассчитывалась). Кроме того, значения потоков коротковолновой радиации внутри облака интерполировались с его верхней и нижней границ и согласно данной методике получалось, что облачность приводит к увеличению поглощения коротковолновой радиации, а следовательно, и генерации ДПЭ.

Пространственное распределение генерации ДПЭ. Расчет генерации производится пусть и по большой, но весьма ограниченной области, поэтому данными охватывается не весь процесс эволюции барических образований (циклоны и антициклоны чаще всего приходят на выбранную область или же уходят за пределы рассматриваемого полигона до заполнения/разрушения), кроме того, и период расчета крайне короткий и далеко не каждый срок охватывает барическое образование полностью. В связи с этим, а так же вследствие того, что суточный ход генерации доступной

потенциальной энергии нивелирует изменения, которые могли бы происходить в процессе эволюции барических образований, анализ изменения генерации ДПЭ в процессе эволюции барических образований не проводился.

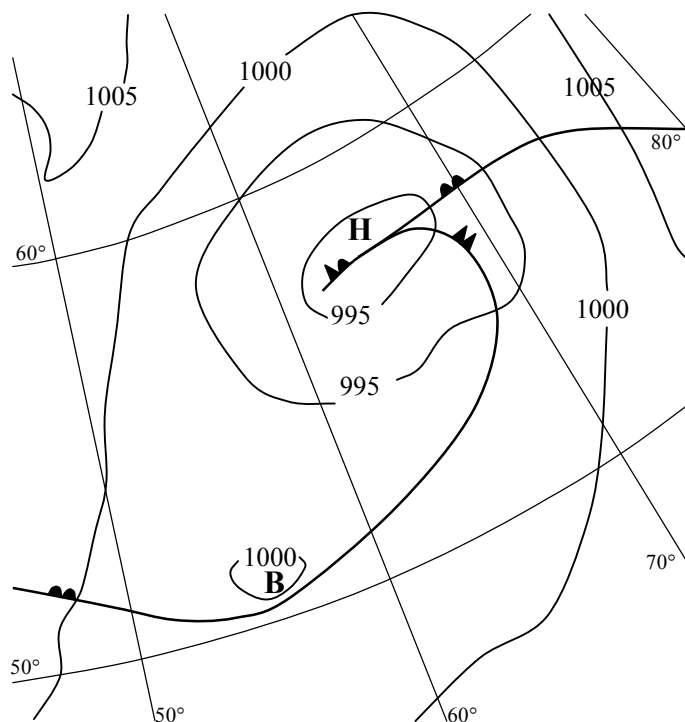


Рис. 4. Поле приземного давления (zPa) за 4 июля 2009 г. (срок 6 ч ВСВ)

Однако очевидно, что генерация ДПЭ распределена в пространстве неравномерно. Для выяснения этого необходимо, чтобы генерация была отличной от нуля (значит, наиболее подходящими сроками будут 6, 9 и 12 ч ВСВ). Обратим внимание на срок 4 июля 2009 г. 6 ч ВСВ.

Рассмотрим синоптическое положение. На рис. 4 показаны приземное поле давления и система атмосферных фронтов. Приземное поле представлено обширным циклоном на стадии заполнения, за холодным фронтом которого начинает развиваться антициклон (давление в центре циклона 987,6 zPa , в центре зарождающегося антициклона 1001,2 zPa). Центр циклона находится над Тюменской областью в районе низовий Иртыша, центр антициклона – над Республикой Башкортостан. Система фронтов представлена фронтом окклюзии, холодным фронтом и тёплыми фронтами и протянулась с юго-запада на северо-восток от Оренбургской к Томской области.

Было рассчитано наличие или отсутствие облачности по критерию Дж. Смагоринского, а так же поле суммарной генерации доступной потенциальной энергии вследствие притоков коротковолновой радиации во всей толще атмосферы в 6 ч ВСВ 04.07.2009 (рис. 5–6).

Сопоставляя рис. 3–5, сделаем следующие основные выводы:

1. Значения генерации ДПЭ в целом уменьшаются с юго-востока на северо-запад, а, значит, прямая зависимость от высоты солнца прослеживается не только во времени, но и в пространстве.

2. Основными областями генерации являются безоблачные пространства, что связано с отражением радиации верхней частью облака. В таком случае к нижним слоям атмосферы доходит меньшее количество коротковолновой радиации, а, значит, наиболее «продуктивные» слои остаются с меньшими потоками. Однако это правило не абсолютно, например, в северо-восточной, западной и восточной областях полигона прояснения не приводят к значительному приросту генерации, где наблюдается меньшее влагосодержание.

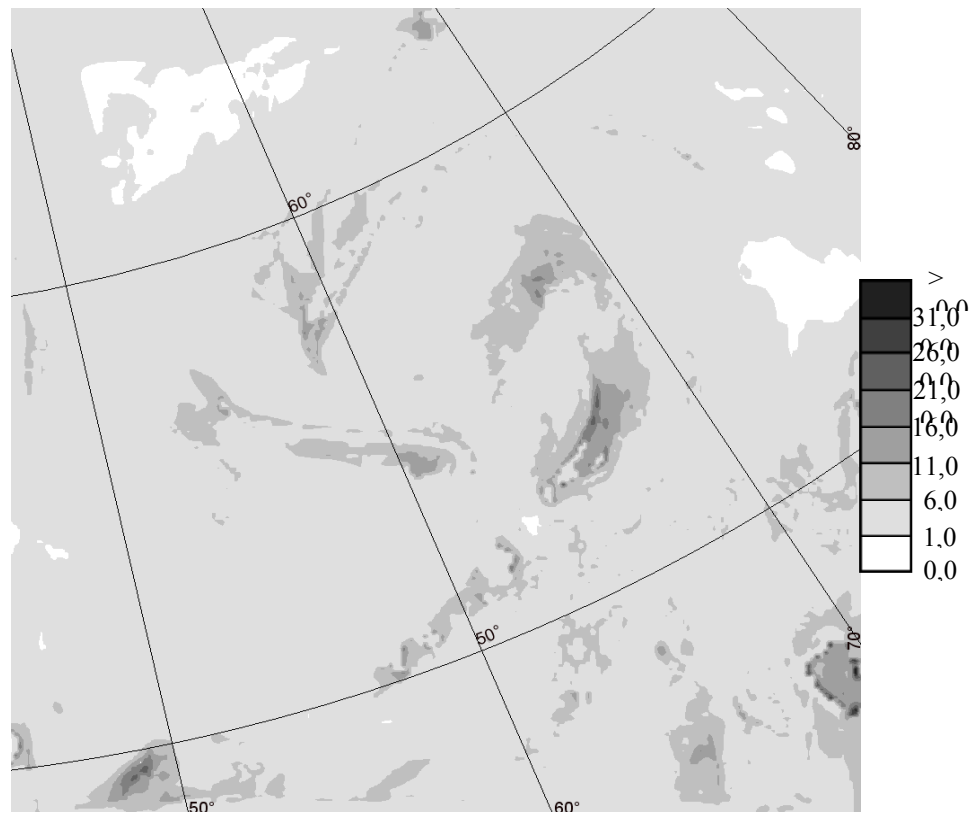


Рис. 5. Поле генерации доступной потенциальной энергии вследствие притоков коротковолновой радиации G ($Вт/м^2$) во всей толще атмосферы за 4 июля 2009 г. (срок 6 ч МСВ).



Рис. 6. Отсутствие или наличие облачности в толще атмосферы по критерию Дж. Смагоринского за 4 июля 2009 г. (срок 6 ч МСВ): □ – облачно; ■ – ясно

3. Очаги генерации прослеживаются и на пространствах с развитыми облачными системами (в особенности точка окклюзии). Данный максимум обусловлен большим влагосодержанием атмосферы, а так же избыточным поглощением коротковолновой радиации в облачной атмосфере. Увеличение влагосодержания атмосферы и толщины облаков у точки окклюзии приводит к наиболее эффективной генерации ДПЭ, но максимум не является главным ввиду альбеда облаков. Кроме того, наличие облачности и более высокое влагосодержание в циклоне приводит к «умеренной» генерации ДПЭ практически по всей его площади.

Сравним значения генерации ДПЭ, осреднённые по площади всего циклона и в районе точки окклюзии. Осреднённые значения представлены в табл. 2, из которой видно, что генерация ДПЭ в районе точки окклюзии оказывается большей за счёт слоёв 700–900 гПа. В более высоких слоях (700–300 гПа) генерация ДПЭ в облаке оказывается меньшей, чем в среднем по всему циклону, и наоборот, над развитыми по вертикали облаками, в слое 300–100 гПа генерация оказывается большей из-за приближения к этим слоям верхней границы облака с высоким альбедо, однако эффективность поглощения коротковолновой радиации в этих слоях значительно меньше и, соответственно, значения оказываются существенно ниже. Таким образом, можно сделать вывод о том, что наибольший вклад облачности в генерацию ДПЭ за счёт притоков коротковолновой радиации наблюдается в слое 700–900 гПа.

Таблица 2

Осреднённые значения генерации доступной потенциальной энергии вследствие притоков коротковолновой радиации, Вт/м²

Слой, гПа	По площади циклона	В районе точки окклюзии
100–200	0,01	0,02
200–300	0,04	0,06
300–400	0,15	0,08
400–500	0,34	0,21
500–600	0,32	0,21
600–700	0,40	0,34
700–800	0,54	0,73
800–900	1,81	2,90
900–1000	1,37	1,08
100–1000	4,59	5,35

Заключение

В работе рассмотрены основные аспекты переноса коротковолновой радиации в атмосфере, вклад её притока в генерацию доступной потенциальной энергии. Была представлена методика оценки генерации доступной потенциальной энергии (ДПЭ) вследствие притоков коротковолновой радиации по данным модели WRF, рассчитана генерация ДПЭ по предложенной методике. При помощи программы Isograph были построены поля генерации ДПЭ, а так же барические поля и поля облачности.

На основе проделанной работы можно сформулировать следующие выводы:

- 1) за счёт притоков коротковолновой радиации происходит только генерация ДПЭ;
- 2) генерация ДПЭ имеет чётко выраженный суточный ход;
- 3) наибольший вклад в генерацию ДПЭ вносят слои атмосферы от 950 до 850 гПа;
- 4) значения генерации ДПЭ находятся в прямой зависимости от высоты Солнца;
- 5) максимумы генерации наблюдаются на безоблачных пространствах и в областях с развитой по вертикали облачностью.

Библиографический список

1. Ван Мигем Ж. Энергетика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 327 с.
2. Дмитриева-Арраго Л.Р., Колоскова Л.Ф., Орлова Л.С. Испытание графика Дж. Смагоринского для определения балла облачности // Труды ГГО. 1969. Вып. 236. С. 31–34.
3. Калинин Н.А. Энергетика циклонов умеренных широт. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1999. 192 с.
4. Калинин Н.А. Динамическая метеорология. Пермь: Перм. кн. изд-во, 2009. 256 с.
5. Калинин Н.А. Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2015. 308 с.

6. Калинин Н.А. Исследование доступной потенциальной энергии циклонов умеренных широт // Метеорология и гидрология. 1997. № 1. С. 37–49.
7. Калинин Н.А., Ветров А.Л. Генерация доступной потенциальной энергии вследствие крупномасштабной конденсации в циклонах умеренных широт // Метеорология и гидрология. 2002. № 4. С. 17–27.
8. Калинин Н.А., Ветров А.Л., Связов Е.М., Попова Е.В. Изучение интенсивной конвекции в Пермском крае с помощью модели WRF // Метеорология и гидрология. 2013. № 9. С. 21–30.
9. Калинин Н.А., Лукин И.Л. Генерация доступной потенциальной энергии вследствие притока длинноволновой радиации в атмосфере // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 50–62.
10. Калинин Н.А., Попова Е.В. Численный прогноз опасных и неблагоприятных снегопадов в Пермском крае 15–16 марта 2013 г. // Учен. зап. Рос. гос. гидрометеорол. ун-та. 2013. № 32. С. 7–16.
11. Калинин Н.А., Смирнова А.А., Ветров А.Л. Мезомасштабный анализ и сверхкраткосрочный прогноз погоды // Учен. зап. Казан. гос. ун-та. Серия Естественные науки. 2009. Т. 151. Кн. 4. С. 209–216.
12. Калинин Н.А., Смородин Б.Л. Редкое явление замерзающего дождя в Пермском крае // Метеорология и гидрология. 2012. № 8. С. 27–35.
13. Лоренц Э.Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 260 с.
14. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 751 с.
15. Программная система для визуализации гидрометеорологических данных Isograph. [Электронный ресурс]. URL: <http://isograph.meteoinfo.ru>. (дата обращения: 25.08.2015).
16. Смородин Б.Л., Калинин Н.А., Давыдов Д.В. Моделирование процесса изменения температуры капель при выпадении замерзающих осадков // Метеорология и гидрология. 2014. № 9. С. 34–40.
17. Среда разработки программного обеспечения Microsoft Visual Studio 2010 express edition. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.microsoft.com/ru-ru/softmicrosoft/VisualStudioExpress.aspx>. (дата обращения: 25.08.2015).
18. A description of the advanced research WRF version 2. NCAR Technical Note NCAR/TN-468+STR. / W.C. Skamarock, J.B. Klemp, J. Dudhia et al. // National Center for Atmospheric Research. 2005. 88 p.
19. Edwards J.M. Slingo A. Studies with a flexible new radiation code. 1: Choosing a configuration for a large-scale model // Q.J.R. Meteorol. Soc. 1996. Vol. 122. P. 689–719.
20. The Weather Research and Forecasting (WRF) Model. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.wrf-model.org/>. (дата обращения: 25.08.2015).

N.A. Kalinin, I.L. Lukin

GENERATION OF AVAILABLE POTENTIAL ENERGY DUE TO THE SHORT-WAVE RADIATION INFLUX ACCORDING TO THE WRF MODEL

Investigated are the features of the distribution of the generation of available potential energy (APE) due to the influx of short-wave radiation in the atmosphere. As a basic field values for calculation of the available potential energy due to the inflow of short-wave radiation was using the calculation result of mesoscale model WRF (Weather Research and Forecasting), obtained in the Perm State University. The results show the influence of the sun, clouds and Humidity on the generation of APE due to the inflow of short-wave radiation.

К е у w o r d s: available potential energy; short-wave radiation; WRF model; water vapour; cloudiness.

Nikolay A. Kalinin, doctor of geographical sciences, Professor of the Department of Meteorology and Atmosphere Protection, Perm State National Research University; 15, Bukireva st., Perm, Russia 614990; kalinin@psu.ru

Ilya L. Lukin, engineer of the Department of Meteorology and Atmosphere Protection, Perm State National Research University; 15, Bukireva st., Perm, Russia 614990; gdytche@gmail.com