

18. Язудин Р.А. О связи радиолокационных характеристик облачных систем с термогигрометрическими параметрами атмосферы // Синоптическая метеорология // Тр./ЗСРНИГМИ. М.: Гидрометеиздат, 1975. Вып. 15. С. 88-101.

L.G. Ananova

THE SEASONAL DISTRIBUTION THE RADAR CHARACTERISTICS OF SQUALLS IN A SOUTHEAST OF WESTERN SIBERIA

Changes the radar characteristics of convective cloud of squalls during warm seasons of year are discussed. Middle statistical values of radar characteristics for southeast of Western Siberia are presented. The results will allow methods of the forecast of squalls to improve.

Key words: squall; the meteorological radar; the complex criterion of the thunderstorm; the radar reflectivity.

УДК 551.551.1:551.511.3

Н.А. Калинин, А.Л. Ветров, О.В. Бушуева

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ДОСТУПНОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ В ЦИКЛОНАХ УРАЛА И ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: kalinin@psu.ru

Проведено исследование особенностей распределения доступной потенциальной энергии в циклонах умеренных широт Урала и Западной Сибири и тестирование модели WRF-ARW. В качестве базовых значений полей для расчета доступной потенциальной энергии использовались результаты счета модели на первые 24 ч. Последующие 24 ч. использовались для оценки точности восстановления значений доступной потенциальной энергии по полигону на различных изобарических поверхностях. Полученные результаты свидетельствуют о довольно различающихся, хотя и принципиально похожих значениях доступной потенциальной энергии в исходных и прогностических полях.

Ключевые слова: циклоны; энергия; модель; погрешность.

Введение

В атмосфере наблюдается большое разнообразие волновых и вихревых движений. С практической точки зрения особый интерес представляют волны синоптического масштаба и связанные с ними синоптические вихри [5, 13]. Синоптические вихри в атмосфере – циклоны и антициклоны – играют первостепенную роль в формировании погодных условий на больших территориях [9, 10]. Циклоны умеренных широт, и в частности Урала и Западной Сибири, играют главную роль в формировании погодных условий на больших территориях благодаря тому, что в циклонах преобладает облачная погода и выпадают осадки [6–8, 11]. В связи с этим исследование процессов зарождения и развития циклонов является одной из важнейших задач теории общей циркуляции атмосферы. Эти исследования ведутся в различных направлениях, среди которых одно из приоритетных – изучение энергетики циклонов.

Проблема энергетики атмосферных процессов является одной из важнейших в современной гидрометеорологии. Обоснованность любой гипотезы, относящейся к атмосфере, определяется в первую очередь тем, насколько удовлетворительно она объясняет важнейшие энергетические функции циркуляционного механизма. Из всех видов энергии в циклоническом вихре особое место

занимает доступная потенциальная энергия, поскольку эта форма энергии в наибольшей степени отражает физическую сущность процессов, происходящих в развивающемся вихре [1, 4, 12, 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.

Актуальность вопроса является очевидной, так как распределение источников и стоков доступной потенциальной энергии, ее перенос и трансформация отражают все основные черты атмосферных процессов, их характер и интенсивность.

Целью данной работы является рассмотрение ДПЭ в циклонах Урала и Западной Сибири на основе данных мезомасштабной прогностической модели WRF.

Синоптические процессы на территории Урала и Западной Сибири имеют некоторые особенности, обусловленные рельефом местности [14]. Ограниченность Западно-Сибирской равнины с запада, юго-востока и востока горными системами Урала, Алтая, Среднесибирского плоскогорья и открытость ее к Северному Ледовитому океану на севере и обширным пространствам Казахстана – Средней Азии на юге способствуют свободному проникновению сюда арктических и тропических масс воздуха, что создает благоприятные условия для интенсивного развития атмосферных процессов.

В зимнее время значительную роль в циркуляционных и погодных условиях Урала и Западной Сибири играет сибирский антициклон, центр которого располагается в Монголии или на юге Восточной Сибири. Антициклон распространяется на южную часть рассматриваемой территории, циклоны при этом чаще всего смещаются по более северным районам. Резкие изменения в погоде Урала и Западной Сибири связаны с перемещением циклонов, развивающихся летом на полярном фронте, а зимой – на арктическом. Повторяемость циклонов за зимний период может значительно колебаться в зависимости от степени развития азиатского антициклона в том или ином году. Из общего числа циклонов чаще всего осуществляется выход южных циклонов (Черноморские, Аральские, Северокаспийские, Южнокаспийские и др.), несколько реже – западных и северо-западных. Преобладают умеренно развитые циклоны. Глубокие циклоны исключительно редки. Средний диаметр циклонов может составлять от 500 км и менее до 1500 км. На территорию Урала и юго-восточных областей Западной Сибири западные и юго-западные циклоны приходят с одинаковой степенью вероятности углубляющимися и заполняющимися. Северо-западные циклоны в двух случаях из трех вступают в стадию заполнения. Непосредственное действие циклона на районы Урала и Западной Сибири чаще всего не превышает одних суток, причем юго-западные циклоны обычно проходят быстрее, чем северо-западные.

Летом циркуляционные процессы на всей территории Урала и Западной Сибири ослаблены, а над южными районами устанавливается термическая депрессия или поле пониженного давления с малыми барическими градиентами. Над северными областями преобладают ложбины и циклоны, но в меньшей степени, чем зимой и в переходные сезоны [15].

В настоящее время общепризнанно, что основным механизмом зарождения синоптических вихрей в атмосфере является гидродинамическая неустойчивость атмосферного потока [5, 13, 18]. Из различных видов гидродинамической неустойчивости наибольшую роль в процессах крупномасштабного вихреобразования играет бароклинная неустойчивость, т. е. неустойчивость атмосферного потока с широтным градиентом температуры (и, следовательно, с вертикальным градиентом скорости ветра) в поле силы Кориолиса. Источником энергии растущих возмущений в таком потоке служит доступная потенциальная энергия [1, 4, 5, 12, 13, 16].

Исходные данные и методика расчетов

В качестве исходного материала использовались данные глобальной модели GFS (Global Forecast System), разработанной NCEP (National Centers for Environmental Prediction) за 0 ч на стандартных изобарических поверхностях, которые заносились в мезомасштабную прогностическую модель WRF, где производился расчет на 48 ч [2]. Каждые 6 часов совершалась подкачка граничных прогностических данных с модели GFS. Поскольку любая модель выдает прогноз на 24 ч, близкий к фактическим значениям, то они являются основой для прогноза на последующие 24 ч. Горизонтальное разрешение модели WRF следующее: 199 узлов с запада на восток и 199 – с севера на юг. При этом шаг сетки одинаков и равен 10 км. Вертикальное разрешение модели – 19 уровней; вертикальный шаг сетки (Δp) – 50 гПа.

Для визуализации пространственного распределения запасов ДПЭ применялась программа Isograph, позволяющая наглядно представлять результаты исследований и расчетов.

Кроме того, использовались синоптические бюллетени и карты.

Доступная потенциальная энергия рассчитывалась по формуле Э.Н. Лоренца [12]:

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

где $\gamma_a = 0,98 \text{ K}/100 \text{ м}$ – сухоадиабатический градиент; σ_T^2 – взвешенное значение дисперсии температуры на изобарической поверхности; γ – вертикальный градиент температуры. Горизонтальная черта сверху означает осреднение по изобарической поверхности [4].

Расчеты ДПЭ производились с использованием формулы (1) на изобарических поверхностях 850–100 гПа по полигонам (расчетным сеткам), представляющим собой прямоугольники с восемью станциями каждый. Область расчета была фиксирована и имела размеры 1940×1940 км, с центром в точке 56,0° в.д. и 57,9° с.ш. (Пермь). С учетом многократного наложения расчетных полигонов друг на друга исключались локальные вариации запасов ДПЭ и более полно выделялись крупномасштабные особенности в их распределении.

Нижние слои атмосферы от поверхности земли до 850 гПа были исключены из анализа, так как на данных поверхностях было велико значение ошибки из-за влияния подстилающей поверхности.

Для проверки достоверности прогностических значений считались следующие ошибки:

средняя относительная ошибка

$$\delta_{ij} = \frac{|X_{ij} - Y_{ij}|}{|Y_{ij}|},$$

средняя абсолютная ошибка

$$\Delta_{ij} = |X_{ij} - Y_{ij}|,$$

средняя систематическая ошибка

$$\sigma_{ij} = X_{ij} - Y_{ij},$$

где X_{ij} – прогностические значения в узле сетки, Y_{ij} – фактические значения [3].

Рассчитывался также коэффициент корреляции между прогностическими и фактическими значениями ДПЭ. Ошибки вычислялись в каждой точке, а затем осреднялись по всему полигону.

Таблица 1

Осредненные по площади циклона запасы ДПЭ ($10^2 \text{ Дж}/\text{м}^2$) по слоям

№ слоя	Слой, гПа	Время действия циклона			Среднее
		1-й день	2-й день	3-й день	
15	100–150	0,24	0,30	0,23	0,26
14	150–200	0,39	0,37	0,28	0,35
13	200–250	0,37	0,38	0,34	0,36
12	250–300	0,32	0,36	0,38	0,35
11	300–350	0,67	0,70	0,69	0,68
10	350–400	0,83	0,86	0,90	0,86
9	400–450	0,77	0,83	0,88	0,83
8	450–500	0,68	0,76	0,72	0,72
7	500–550	0,68	0,78	0,69	0,72
6	550–600	0,64	0,73	0,59	0,65
5	600–650	0,77	0,75	0,62	0,71
4	650–700	1,32	0,83	0,76	0,97
3	700–750	1,59	2,23	1,10	1,64
2	750–800	2,06	2,25	2,01	2,11
1	800–850	2,72	2,82	2,00	2,51

Обсуждение результатов

Для анализа общей характеристики процессов, управляющих распределением и изменением ДПЭ в циклонических образованиях значения ДПЭ осреднялись по всей площади циклонов, которая определялась по последней замкнутой изобаре на приземных синоптических картах (изобары

проводились через 1 гПа). Всего было рассмотрено три циклона, развивавшиеся в июле 2009 г. Результаты этих расчетов представлены в табл. 1.

Наибольшие значения ДПЭ в циклоне отмечаются в слое 800–850 гПа. Также в этом слое отмечается максимальная абсолютная ошибка ($2,3 \cdot 10^2 \text{ Дж/м}^2$). Такие показатели объясняются влиянием турбулентных процессов в пограничном слое, поэтому значения ДПЭ в этом слое максимальны.

Далее с высотой значения ДПЭ уменьшаются, но наблюдается еще один максимум в слое 350–400 гПа. Это связано с тем, что в тропосфере температура воздуха убывает с высотой со средним вертикальным градиентом около $0,65 \text{ К/100 м}$, а вблизи тропопаузы вертикальный градиент температуры уменьшается до $0,2 \text{ К/100 м}$ и ниже. В связи с этим распределение температуры на изобарических поверхностях становится более пестрым, что приводит к росту дисперсии температуры. Значения ДПЭ, как следует из формулы (1), при этом увеличиваются. Максимум в распределении ДПЭ в первые два дня отмечается в слое 200–350 гПа, а в последний день – в слое 350–450 гПа (табл. 1). Это обусловлено тем, что по мере развития циклонического образования происходит его выхолаживание, и высота тропопаузы в нем уменьшается [4]. Минимальные значения ДПЭ прослеживаются в последнем рассматриваемом слое 100–150 гПа.

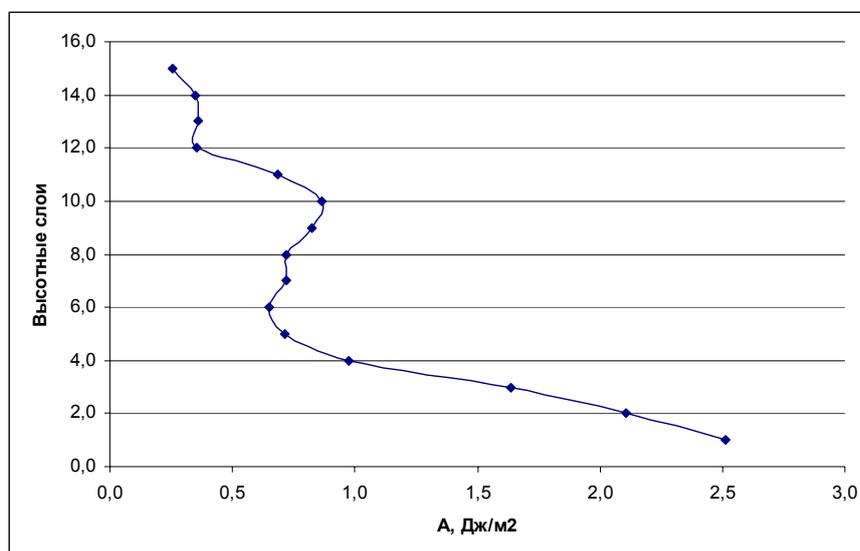


Рис. 1. Запасы ДПЭ, осредненные по площади циклона (10^2 Дж/м^2)

В процессе эволюции циклонов максимальные значения ДПЭ отмечались в середине стадии развития циклонов, т.е. сначала идет накопление запасов ДПЭ, а затем ее уменьшение. Такой результат обусловлен эволюцией фронтальных систем, так как по мере углубления циклона степень бароклинности его фронтальной системы усиливается [4, 17]. Представленные в последнем столбце табл. 1 данные для наглядности приведены на рис. 1.

Полученные результаты не противоречат исследованиям, проводимым ранее [4, 16], а лишь дополняют их. Так как значения ДПЭ существенно зависят от шага сетки и от числа узлов, для которых рассчитывается дисперсия, то это обстоятельство приводит к несколько другим результатам.

Из рис. 2 следует, что пространственная изменчивость запасов ДПЭ в тропосфере Земли полностью определяется характером общей циркуляции атмосферы. Наибольшие значения ДПЭ соответствуют центральным областям циклона, что объясняется наличием максимальной бароклинности атмосферы в данных районах из-за больших градиентов температуры в районе фронта.

Бароклинные процессы опускания холодного воздуха и поднятия теплого обуславливают генерацию кинетической энергии, процесс преобразования доступной потенциальной энергии в кинетическую. Для того чтобы этот процесс развивался, температура на уровне не должна быть постоянной. Если стратификация устойчива, то температура на фиксированной высоте будет повышаться при опускании и понижаться при подъеме воздушных масс. Следовательно, этот процесс будет уменьшать горизонтальные градиенты температуры вплоть до их полного исчезновения. Таким образом, чем больше горизонтальные градиенты температуры и меньше устойчивость, тем большие значения кинетической энергии могут быть достигнуты, т.е. тем больше ДПЭ [1, 4].

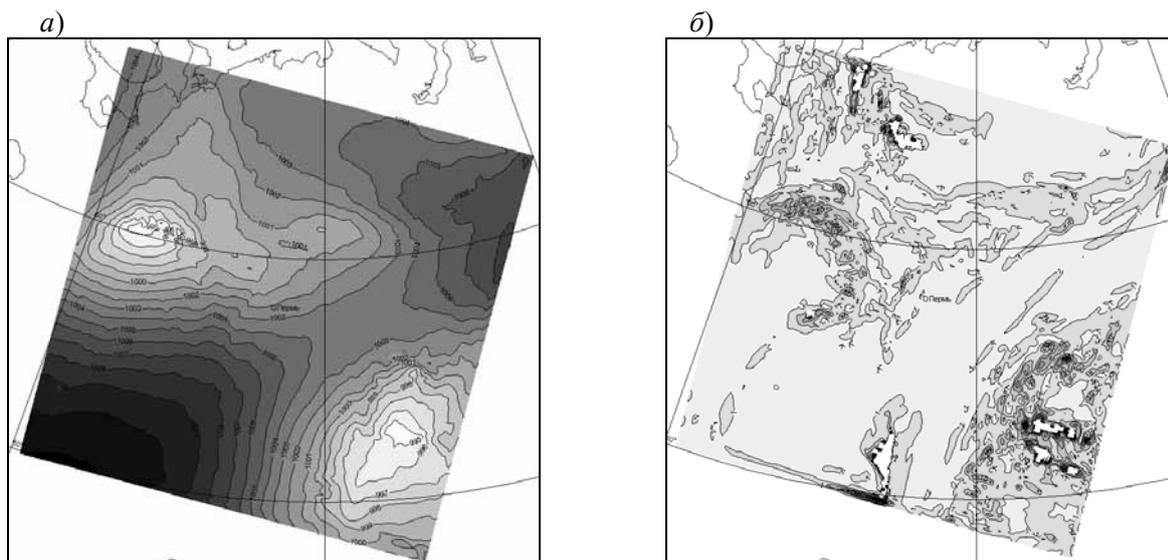


Рис. 2. Приземное давление (а) и запасы ДПЭ (б), 3 ч, 3.07.2009 г.

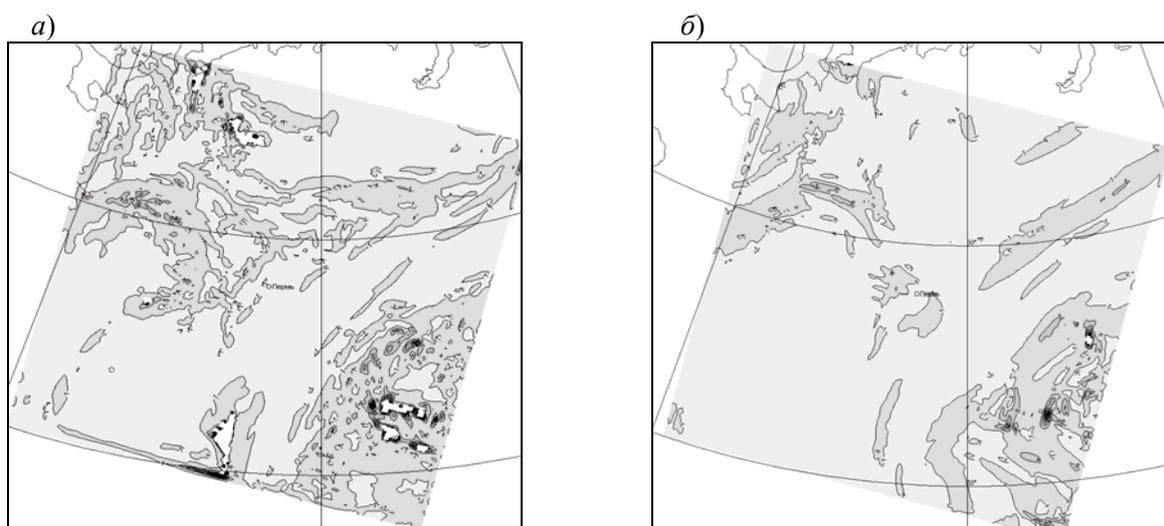


Рис. 3. Прогностические (а) и фактические (б) поля ДПЭ в слое 800–850 гПа, срок 6 ч

При сравнении прогностических и фактических карт (рис. 3) можно отметить, что прогностические запасы ДПЭ по сравнению с фактическими завышены. Изолиния $1 \cdot 10^2$ Дж/м² на прогностической карте охватывает большую область, чем на фактической. Коэффициент корреляции между прогностическими и фактическими значениями ДПЭ максимален в слое 700–750 гПа и составляет 0,47, что соответствует наличию средней степени взаимосвязи (табл. 2).

Среднее значение коэффициента корреляции по всем изобарическим поверхностям составляет 0,27 – слабая степень взаимосвязи (рис. 4).

Среднее значение относительной ошибки по высотным слоям составляет 38%. Максимальна ошибка в нижнем слое 750–800 гПа (44%), а минимальна на верхнем 150–200 гПа (29%) (рис. 5).

При прогнозе на 24 ч наибольшие значения средней относительной ошибки отмечаются на первые три часа прогноза – 64%. В последующие сроки ошибка равна 30–40% (рис. 6).

Систематические ошибки свидетельствуют о регулярном завышении (занижении) значений ДПЭ в циклоне. При расчете данной ошибки по высотным слоям максимальное отклонение от среднего положения составило в слое 500–550 гПа ($0,11 \cdot 10^2$ Дж/м²), а минимальное в слое 150–200 ($-0,3 \cdot 10^2$ Дж/м²). Максимальна систематическая ошибка также в первый срок прогноза на три часа ($0,21 \cdot 10^2$ Дж/м²) (рис. 7, 8).

В слое 100–850 гПа отмечается максимальное отклонение результата измерения от истинного значения ДПЭ и составляет $2,3 \cdot 10^2$ Дж/м, а по времени ошибка максимальна в 12 ч (рис. 9, 10).

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между прогностическими и фактическими значениями ДПЭ

№ слоя	Слой, гПа	Заблаговременность, ч								Среднее
		27	30	33	36	39	42	45	48	
15	100–150	0,21 (0,22)	0,32 (0,34)	0,53 (0,60)	0,34 (0,35)	0,23 (0,24)	0,20 (0,20)	0,11 (0,11)	0,16 (0,16)	0,26 (0,27)
14	150–200	0,37 (0,39)	0,29 (0,30)	0,37 (0,39)	0,32 (0,34)	0,25 (0,25)	0,21 (0,22)	0,20 (0,20)	0,30 (0,31)	0,29 (0,30)
13	200–250	0,23 (0,24)	0,18 (0,19)	0,29 (0,30)	0,33 (0,35)	0,19 (0,20)	0,20 (0,21)	0,25 (0,25)	0,38 (0,42)	0,26 (0,26)
12	250–300	0,25 (0,25)	0,27 (0,27)	0,34 (0,36)	0,15 (0,15)	0,22 (0,22)	0,20 (0,20)	0,21 (0,22)	0,31 (0,32)	0,24 (0,25)
11	300–350	0,29 (0,29)	0,26 (0,26)	0,21 (0,21)	0,22 (0,22)	0,19 (0,20)	0,25 (0,26)	0,21 (0,21)	0,12 (0,12)	0,22 (0,22)
10	350–400	0,24 (0,24)	0,28 (0,29)	0,23 (0,23)	0,28 (0,29)	0,24 (0,25)	0,18 (0,18)	0,20 (0,21)	0,18 (0,18)	0,23 (0,23)
9	400–450	0,20 (0,25)	0,15 (0,15)	0,20 (0,20)	0,27 (0,28)	0,23 (0,23)	0,16 (0,16)	0,21 (0,21)	0,31 (0,32)	0,22 (0,22)
8	450–500	0,13 (0,13)	0,17 (0,17)	0,20 (0,21)	0,29 (0,30)	0,21 (0,22)	0,21 (0,22)	0,27 (0,28)	0,28 (0,29)	0,22 (0,22)
7	500–550	0,09 (0,09)	0,18 (0,18)	0,24 (0,24)	0,29 (0,30)	0,17 (0,17)	0,19 (0,19)	0,24 (0,24)	0,21 (0,21)	0,20 (0,20)
6	550–600	0,11 (0,11)	0,21 (0,21)	0,35 (0,36)	0,30 (0,33)	0,24 (0,24)	0,21 (0,21)	0,21 (0,22)	0,20 (0,20)	0,23 (0,23)
5	600–650	0,20 (0,20)	0,26 (0,27)	0,32 (0,33)	0,32 (0,33)	0,22 (0,22)	0,24 (0,24)	0,37 (0,38)	0,32 (0,34)	0,28 (0,29)
4	650–700	0,44 (0,47)	0,46 (0,50)	0,42 (0,45)	0,40 (0,42)	0,26 (0,27)	0,30 (0,31)	0,42 (0,44)	0,31 (0,31)	0,38 (0,40)
3	700–750	0,48 (0,53)	0,53 (0,59)	0,62 (0,72)	0,58 (0,67)	0,40 (0,43)	0,34 (0,36)	0,44 (0,48)	0,35 (0,37)	0,47 (0,51)
2	750–800	0,41 (0,44)	0,64 (0,76)	0,57 (0,64)	0,38 (0,40)	0,27 (0,27)	0,21 (0,22)	0,22 (0,22)	0,23 (0,23)	0,37 (0,38)
1	800–850	0,33 (0,34)	0,18 (0,18)	0,32 (0,33)	0,31 (0,32)	0,29 (0,30)	0,17 (0,17)	0,14 (0,14)	0,13 (0,3)	0,23 (0,24)
Среднее		0,27 (0,27)	0,29 (0,30)	0,35 (0,36)	0,32 (0,33)	0,24 (0,25)	0,22 (0,22)	0,25 (0,25)	0,25 (0,28)	0,27 (0,28)

Примечание. В скобках (0,22) – уровень значимости Фишера

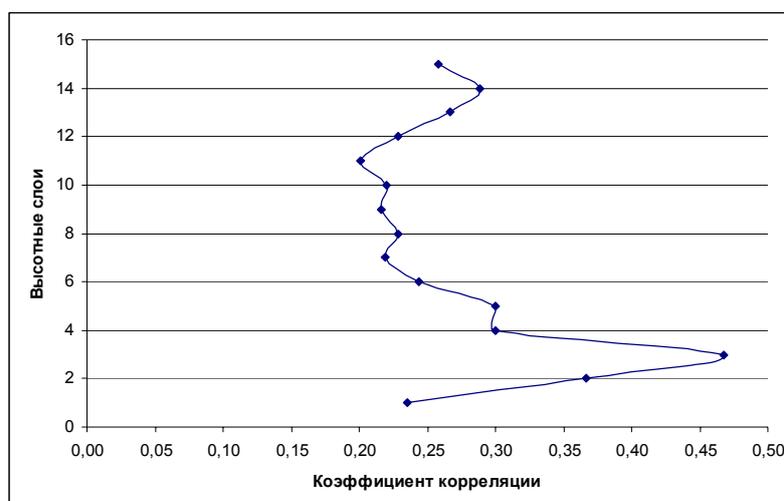


Рис. 4. Изменение коэффициента корреляции по высоте

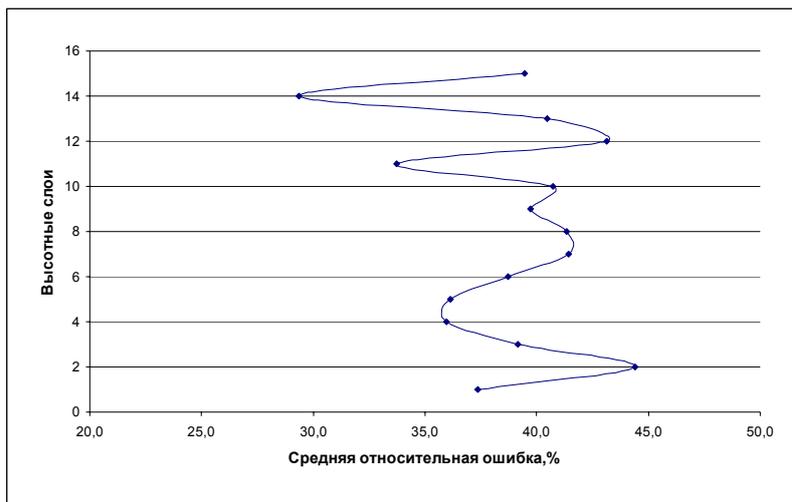


Рис. 5. Изменение средней относительной ошибки по высоте %

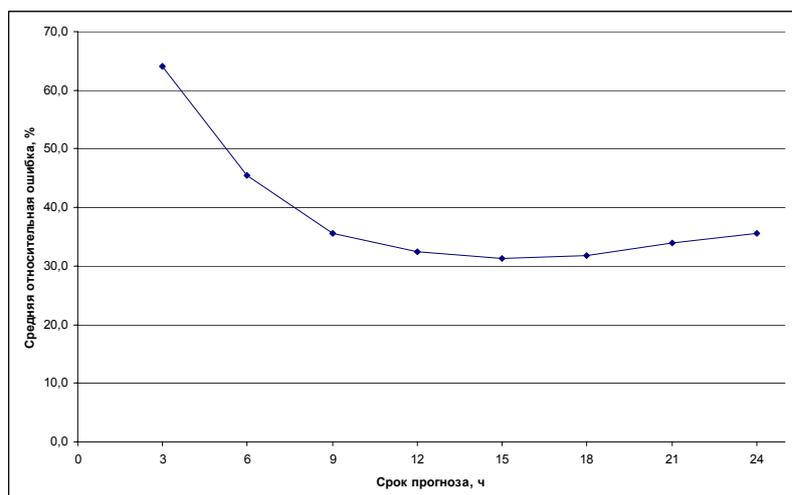


Рис. 6. Среднее значение относительной ошибки ДПЭ в слое 100–850 гПа, %

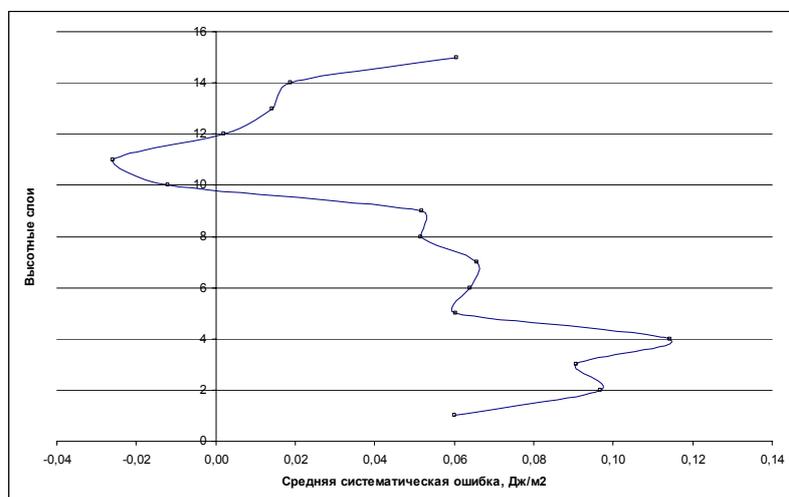
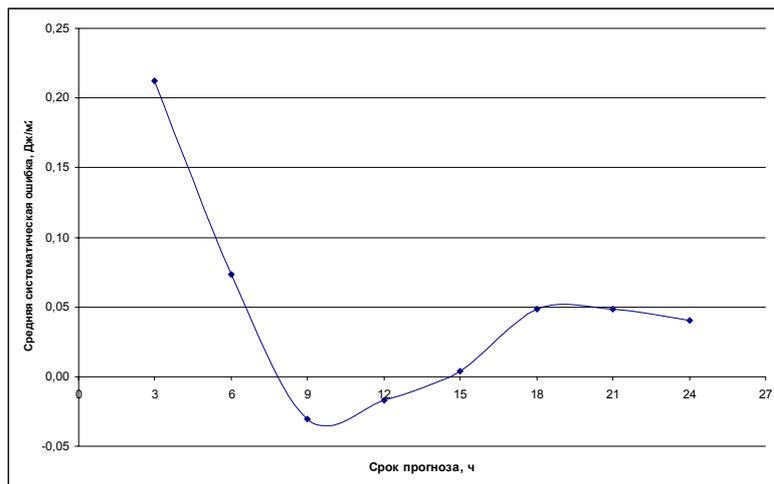
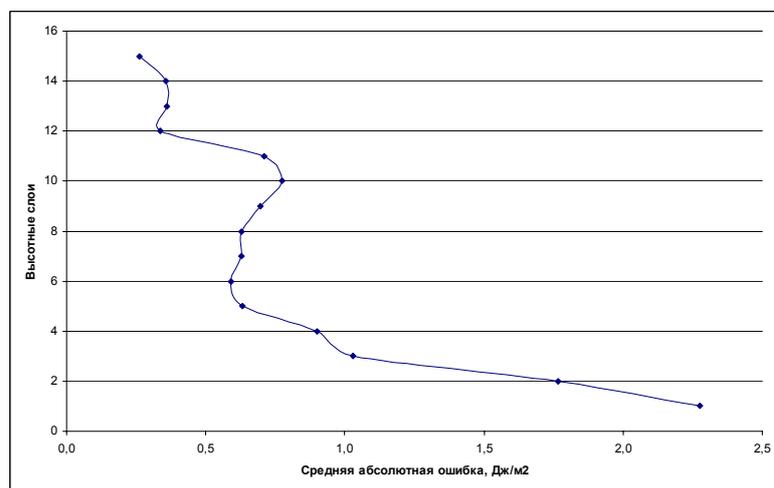
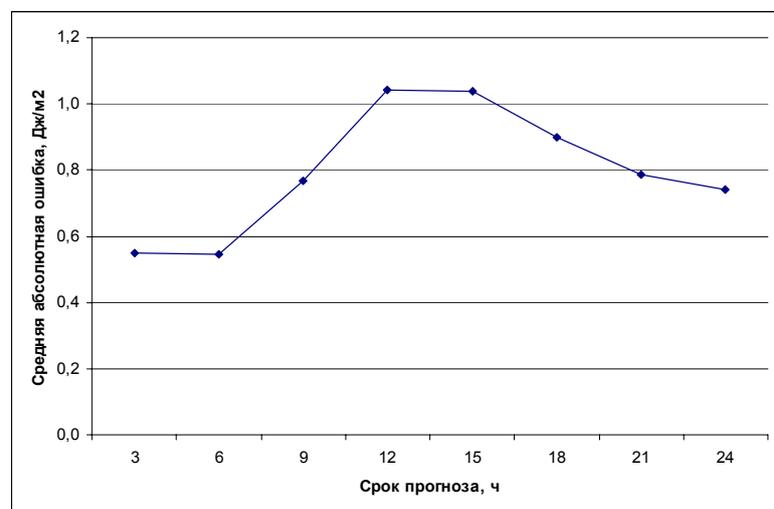


Рис. 7. Изменение средней систематической ошибки по высоте, 10^2 Дж/м²

Рис. 8. Изменение средней систематической ошибки по времени в слое 100–850 гПа, 10^2 Дж/м²Рис. 9. Изменение средней абсолютной ошибки по высоте, 10^2 Дж/м²Рис. 10. Изменение средней абсолютной ошибки по времени в слое 100–850 гПа, 10^2 Дж/м²

При расчете ДПЭ также получались отрицательные результаты или слишком завышенные значения ДПЭ (порядка 10^6). Исходя из формулы (1) такие результаты возможны. Физически это означает, что ДПЭ в этом случае генерирует за счет неадиабатического притока тепла, например, при адвекции холодных воздушных масс, когда $\gamma \geq \gamma_a$ [4]. От общего объема данных такие случаи составили около 5%.

Выводы

1. Наибольшие значения ДПЭ в циклоне по высоте отмечаются в слое 800–850 гПа. Из-за влияния турбулентных процессов в пограничном слое значения ДПЭ в этом слое максимальны. Далее с высотой значения ДПЭ уменьшаются, но наблюдается еще один максимум в слое 350–400 гПа, это связано с тем, что распределение температуры на изобарических поверхностях становится более пестрым из-за малого вертикального градиента температуры в тропопаузе (0,2 К/100 м и ниже), что приводит к росту дисперсии температуры. Значения ДПЭ, как следует из формулы (1), при этом увеличиваются. Второй максимум в первые два дня действия циклонов отмечается в слое 200–350 гПа, а в последний день – в слое 350–450 гПа. Это обусловлено тем, что по мере развития циклонического образования происходит его выхолаживание и высота тропопаузы в нем уменьшается [8].

2. В процессе эволюции циклонов максимальные значения ДПЭ отмечались в середине стадии развития циклонов, т.е. сначала идет накопление запасов ДПЭ, а затем ее уменьшение. Такой результат обусловлен эволюцией фронтальных систем, так как по мере углубления циклона степень бароклинности его фронтальной системы усиливается.

3. Пространственная изменчивость запасов ДПЭ в тропосфере Земли полностью определяется характером общей циркуляции атмосферы. Наибольшие значения ДПЭ соответствуют центральным областям циклона, что объясняется наличием максимальной бароклинности атмосферы в данных районах из-за больших градиентов температуры в районе фронта.

4. При сравнении прогностических и фактических значений ДПЭ можно отметить, что прогностические запасы ДПЭ по сравнению с фактическими завышены.

5. Коэффициент корреляции между прогностическими и фактическими значениями ДПЭ максимален в слое 700–750 гПа и составляет 0,47, что соответствует наличию средней степени взаимосвязи. Среднее значение коэффициента корреляции по всем изобарическим поверхностям составляет 0,27 – слабая степень взаимосвязи.

6. Среднее значение относительной ошибки по высотным слоям составляет 38%, максимальна ошибка в нижнем слое 750–800 гПа (44%), где велико влияние турбулентных процессов пограничного слоя, а минимальна на верхнем 150–200 гПа (29%).

7. При прогнозе на 24 ч наибольшие значения средней относительной ошибки отмечаются на первый три часа прогноза – 64%. В последующие сроки ошибка равна 30–40%.

8. С учетом того, что любая модель выдает прогноз на 24 ч, близкий к фактическим значениям, анализировался прогноз ДПЭ только на вторые сутки. Исходя из полученных ошибок и коэффициентов корреляции, можно сделать вывод, что необходимо исследовать также и первые сутки прогноза.

9. В результате определения фактических и прогностических значений ДПЭ, их анализа и расчета относительных, абсолютных, систематических ошибок и коэффициентов корреляции можно сделать вывод, что мезомасштабная прогностическая модель WRF адекватно считает значения ДПЭ и возможно ее использование для прогноза циклонических вихрей на основе энергетических характеристик. Однако с учетом анализа ошибок прогноза модельные расчеты целесообразно применять для прогнозов на вторые сутки с заблаговременностью 33–48 часов и для слоев выше 750 гПа.

Авторы благодарят В.С.Дозморову за помощь в проведении расчетов.

Библиографический список

1. Ван Мигем Ж. Энергетика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 327 с.
2. Вельтищев Н.Ф. Информация о моделях общего пользования MM5 и WRF / под ред. В.А.Анцыповича. М., 2005. 97 с.
3. Исаев А.А. Статистика в метеорологии и климатологии. М., Изд-во МГУ, 1988. 145 с.
4. Калинин Н.А. Энергетика циклонов умеренных широт. Пермь: Изд-во Перм. гос. ун-та, 1999. 192 с.

5. Калинин Н.А. Динамическая метеорология / Перм. гос. ун-т. Изд. 2-е, испр. Пермь: РГГМУ; СПб.: Перм. кн. изд-во, 2009. 256 с.
6. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Совместное использование данных радиолокационных и станционных наблюдений для анализа облачных полей // Метеорология и гидрология. 2002. № 8. С. 53–60.
7. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Численный анализ данных радиолокационных и станционных измерений облачности // Метеорология и гидрология. 2003. № 7. С. 31–39.
8. 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.
9. Калинин Н.А., Ермакова Л.Н., Аликина И.Я. Особенности формирования высокой температуры воздуха в сентябре – октябре 2003 г. на Среднем и Южном Урале // Метеорология и гидрология. 2005. № 5. С. 82–89.
10. Калинин Н.А., Кислов А.В., Бабина Е.Д., Ветров А.Л. Оценка качества воспроизведения моделью MM5 температуры воздуха в июле на Урале // Метеорология и гидрология. 2010. № 10. С. 15–22.
11. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Определение водности и водозапаса кучево-дождевой облачности по информации метеорологического радиолокатора // Метеорология и гидрология. 2011. № 2. С. 30–43.
12. Лоренц Э.Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы / пер. с англ.; под ред. С.С. Зилитинкевича. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 260 с.
13. Матвеев Л.Т., Матвеев Ю.Л., Солдатенко С.А. Качественный анализ возникновения синоптических вихрей в атмосфере // Метеорология и гидрология. 1994. № 8. С. 19–32.
14. Назаров Н.Н. Современный экзогенный морфогенез ландшафтов таежного Предуралья и Урала (западный склон): автореф. дис. на соиск. уч. ст. д. географ. наук. СПб., 1996.
15. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1986. Ч. 2. Вып.2. 198 с.
16. Титов С.И. Использование энергетических характеристик атмосферы при оценке эволюции барических образований // Метеорологические прогнозы. Л., 1989. Вып. 102. С. 97–99.
17. Толмачева Н.И., Ермакова Л.Н. Мезоструктурные особенности атмосферных фронтов по радиолокационной и спутниковой информации // Географический вестник. 2009. №3(11). С. 7–14.
18. Шакина Н.П. Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 310 с.

N.A. Kalinin, A.L. Vetrov, O.V. Bushueva
FEATURES OF CHANGE OF ACCESSIBLE POTENTIAL ENERGY IN CYCLONES
OF URAL MOUNTAINS AND WESTERN SIBERIA

Research of features of distribution of accessible potential energy is conducted in cyclones of midlatitudes of Ural Mountains and Western Siberia and testing of model WRF-ARW. As base values of fields for calculation of accessible potential energy were used results of the account of model on the first 24 hours. The next 24 hours were used for an estimation of accuracy of restoration of values of accessible potential energy on range on various isobaric surfaces. The received results the witness-stvujut about enough differing, though also essentially similar values of accessible potential energy in initial and prognostic fields.

К е у в о р д с : cyclones; energy; model; an error.