

УДК 551.58

## **Энергетические характеристики атмосферы при циклогенезе над районами Васюганского Болота**

*Е.Л. Тунаев, В.П. Горбатенко*

*Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Россия  
eug\_t@mail2000.ru*

Представлен анализ энергетических характеристик атмосферы в дни местного циклогенеза над территорией Западной Сибири в 2015–2017 гг. Рассчитаны наиболее важные для синоптических атмосферных процессов виды энергии. Выявлено, что около 40 % всех образовавшихся циклонов получили импульс к развитию непосредственно над территорией Васюганского Болота. Энергия скрытой теплоты фазовых переходов воды может быть использована в качестве одного из предикторов, определяющих процесс местного циклогенеза над Васюганьем в теплый период года.

*Ключевые слова:* циклогенез, энергетика местных циклонов, Васюганское Болото

## **Energy characteristics of the atmosphere during cyclogenesis over the Vasyugan Swamp**

*E.L. Tunaev, V.P. Gorbatenko*

*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia  
eug\_t@mail2000.ru*

The analysis of energy characteristics of the atmosphere during the days of local cyclogenesis over West Siberia in 2015-2017 is presented. The most important types of energy for synoptic-scale atmospheric processes were calculated. It is revealed that about 40% of all cyclones were generated directly above the territory of the Vasyugan Swamp. The latent heat energy of water phase transitions can be used as one of the predictors defining the local cyclogenesis over the Vasyugan Swamp region during the warm season.

*Keywords:* cyclogenesis, energy of local cyclones, Vasyugan Swamp

### **Введение**

Циклоны умеренных широт [13] являются важнейшими элементами общей циркуляции атмосферы, на фоне которых над различными районами может происходить формирование мезовихрей [7, 9], т. е. циклонов меньшего масштаба, так называемых местных циклонов (МЦ). С данными циклонами часто связаны ошибки в прогнозах основных метеорологических полей, вследствие того, что локализация центра такого циклона трудно поддается прогнозированию.

Как правило, МЦ являются результатом возникновения на тропосферном фронте динамически неустойчивых бароклинических волн [8, 35]. Бароклиническая неустойчивость определяется как динамическая неустойчивость в основном зональном переносе и связана с наличием меридионального градиента температуры и, как следствие, термического ветра [8, 35]. Источником энергии растущих возмущений в таком потоке служит доступная потенциальная энергия атмосферы.

Роль термического фактора, тепло- и влагообмена с подстилающей поверхностью при процессе местного циклогенеза тоже очень велика [4, 25, 36]. При перемещении с холодной на теплую поверхность холодная и сухая воздушная масса насыщается теплом и влагой. Быстрое образование облачности с выделением скрытого тепла может привести к развитию глубокой конвекции [3, 6, 31] и образованию интенсивного мезоциклона.

Также способствует циклогенезу баротропная неустойчивость атмосферы [14, 32]. Динамическая волновая неустойчивость бездивергентного потока связана с горизонтальным сдвигом ветра. При этом могут образоваться так называемые вихри сдвига (*shear vortex*) незначительных размеров, которые при соответствующих дополнительных условиях на верхних уровнях трансформируются в МЦ. Во время такого процесса кинетическая энергия баротропных возмущений возрастает за счет кинетической энергии основного переноса [2]. Заметим, что из всех видов энергии, преобразующихся в циклонах умеренных широт, особое место занимает кинетическая энергия. Это обусловлено тем, что она в наибольшей степени отражает физическую сущность процессов, происходящих в циклонах. По этой причине одна из главных проблем теории общей циркуляции атмосферы – проблема описания трансформации кинетической энергии в циклоны умеренных широт.

Для гидродинамического описания развития мезоциклона и его конвективных систем используется концепция так называемой условной неустойчивости второго рода (*conditional instability of the second kind – CISK*) [26].

Эта концепция впервые была использована для описания развития тропических циклонов [23, 24], но впоследствии она была применена также и для других мезоциклонов [21, 34]. Сущность этой концепции состоит в представлении о взаимодействии и взаимном усилении возмущений двух различных масштабов: глубокой влажной конвекции и циклонического вихря [22, 27]. Вихрь привносится извне и может быть следствием бароклинической неустойчивости (имеющей место в области возникновения этого возмущения), орографических влияний и других факторов. Присутствие циклонической циркуляции обуславливает конвергенцию воздуха к центру, где развивается мощная конвекция в условно-неустойчивом воздухе с выделением тепла, происходит взаимное усиление циклонической циркуляции и конвекции, в результате чего развивается интенсивный мезоциклон.

Важнейшая особенность условной неустойчивости второго рода, в отличие от бароклиной неустойчивости, состоит в том, что источником ее энергии является выделение скрытого тепла при глубокой конвекции, а не кинетическая либо потенциальная энергия основного потока. Возможно, этот механизм может способствовать образованию МЦ и в исследуемом районе, но вряд ли является основным.

Практика показывает, что синоптические вихри формируются как низкие барические образования и охватывают на начальных стадиях своего развития только нижний слой тропосферы толщиной 2–3 км [17]. Это означает, что в реальных условиях наиболее часто потеря устойчивости происходит именно в нижних слоях атмосферы. Присутствие планетарных волн и близость высотной фронтальной зоны [15], вдоль которой отмечаются повышенные градиенты температуры и давления, расширяет возможности возникновения синоптических вихрей в атмосфере и формирует районы, наиболее благоприятные для зарождения циклонических синоптических вихрей, так называемые бароклино-активные районы [20, 35], к которым можно отнести территорию Васюганского Болота (ВБ) с его особым микроклиматом. Здесь расположены огромные резервуары пресной воды в виде многочисленных рек и озер, которые являются дополнительным источником влаги. Также выявлено, что около 40 % всех образующихся над Западной Сибирью молодых циклонов получили импульс к развитию непосредственно над территорией ВБ. Данные мезовихри чаще всего (63 %) формировались на основных холодных фронтах и имели волновую природу [18], а также обладали значительными общими запасами энергии.

Кроме синоптического подхода, в анализе характеристик местного циклогенеза важно учитывать энергетические запасы в атмосфере, над районами образования и перемещения циклонов. Необходимо рассматривать разные виды энергии, которыми обладает воздушная масса, и их взаимные превращения не только непосредственно в течение жизни циклона, но и за несколько дней до его зарождения и после полного заполнения. Это поможет определить некоторые пороговые градации энергетических запасов атмосферы, при которых над анализируемым районом при той или иной синоптической ситуации может сформироваться циклон. Это послужит неким маркером, способным помочь в прогнозе погоды (как в численном, так и в оперативном).

Таким образом, в исследовании процессов зарождения и развития циклонов одним из наиболее важных подходов является изучение их энергетики. С помощью такого метода обеспечивается единая шкала при оценке вклада различных атмосферных процессов в развитие циклонов, что позволяет описать физические механизмы этого развития, в первую очередь изучение энергетики местных циклонов актуально для улучшения прогнозов погоды с помощью региональных мезомасштабных моделей [33].

Целью настоящей работы является анализ энергетических параметров атмосферы в дни местного циклогенеза над Западной Сибирью и отдельно над территорией ВБ в 2015–2017 гг.

Территория исследований географически размещена в пределах 50–64° с. ш., 60–90° в. д.

Для изучения энергетики рассматриваемых циклонов, использовались результаты сетевого температурно-ветрового зондирования за 00 и 12 ч ВСВ, а также синоптические и кольцевые карты погоды из архива фонда данных ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС».

Рассчитывались наиболее важные для атмосферных процессов синоптического масштаба виды энергии, отнесенные к единице массы:

- 1) кинетическая энергия горизонтальных движений  $K = (U^2 + V^2)/2$ ;
- 2) потенциальная энергия  $\pi = g \cdot z$ ;
- 3) внутренняя энергия  $I = C_v \cdot T$ ;
- 4) энергия скрытой теплоты фазовых переходов воды  $Ec$ .

Уравнениями, описывающими балансы энергий в квазистатическом приближении (для единицы массы), являются [2, 11, 15, 19, 28, 29]:

$$K = \frac{1}{2g} \int_P^{P_0} V^2 dp, \quad (1)$$

$$\pi = \frac{R}{g} \int_P^{P_0} T dp - zp, \quad (2)$$

$$I = \frac{C_v}{g} \int_P^{P_0} T dp, \quad (2)$$

$$I = \frac{C_v}{g} \int_P^{P_0} T dp, \quad (3)$$

$$Ec = \frac{L}{g} \int_P^{P_0} W dp, \quad (4)$$

где  $V$  – вектор скорости для элемента массы  $dm$ , м/с;  $z$  – высота, м;  $R = 287$ , Дж/кг;  $K$  – универсальная газовая постоянная сухого воздуха;  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;  $C_v$  – удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме, Дж/кг К;  $T$  и  $P$  – температура, К, и давление воздуха, гПа;  $W$  – массовая доля водяного пара, г/кг;  $L = 2,49 \cdot 10^6$  Дж/кг – скрытая теплота парообразования.

Все элементы уравнений (1) – (4) рассчитывались для района аэрологической станции, располагающейся в области циклона, для слоев, находящихся между основными изобарическими поверхностями в толще атмосферы от поверхности Земли и до 200 гПа и были отнесены к единице площади. Далее для уравнений (1) – (4) производилась линейная интерполяция [1, 5] метеорологических полей в центр барического образования

(местного циклона). При этом расстояние от аэрологической станции до центра циклона в разные дни его жизни изменялось от 10 до 300 км. Всего были изучены энергетические характеристики 24 циклонов, сформировавшихся над исследуемым районом.

Ранее расчеты энергетических характеристик проводились только для циклонов больших масштабов (диаметром порядка 2000 км) и для умеренных широт Северного полушария [10, 12, 13].

### Параметры атмосферы в дни циклогенеза над Западной Сибирью

Настоящие исследования (табл. 1) показали, что рассматриваемые циклонические образования обладают значительными запасами энергии: кинетическая энергия в столбе атмосферы от поверхности Земли до 200 гПа в циклонах, образовавшихся в холодное полугодие составляет, в среднем,  $1,5 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>2</sup>, что сопоставимо с аналогичными значениями [30] для единичного столба всей атмосферы, при этом максимальные запасы кинетической энергии могут вдвое превышать данные значения ( $2,9 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>2</sup>).

**Таблица 1.** Средние и максимальные значения различных видов энергии местных циклонов (МЦ) в теплый и холодный периоды года

**Table 1.** Average and maximum values of different types of energy of local cyclones (LC) in the warm and cold periods of the year

Период образования циклона	Виды энергии							
	Кинетическая, $10^6$ Дж/м <sup>2</sup>		Потенциальная, $10^8$ Дж/м <sup>2</sup>		Внутренняя, $10^9$ Дж/м <sup>2</sup>		Энергия скрытой теплоты фазовых переходов воды, $10^7$ Дж/м <sup>2</sup>	
	ср (σ)	макс	ср (σ)	макс	ср (σ)	макс	ср (σ)	макс
Теплое полугодие	0,7 (0,2)	1,1	1,1 (0,2)	1,3	0,3 (0)	0,3	0,7 (0,5)	1,3
Холодное полугодие	1,5 (0,8)	2,9	1,8 (0,8)	4,0	0,4 (0,1)	0,6	0,3 (0,2)	0,6

В циклонах, образовавшихся в теплое полугодие, средние запасы кинетической энергии были в два, а максимальные значения в три раза меньше ( $0,7 \cdot 10^6$  и  $1,1 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>2</sup> соответственно). Причем замечено, что в ночные часы отмечались более высокие значения, чем в дневные (например, средние январские значения кинетической энергии составили 0,8 и  $0,7 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>2</sup>, соответственно, в сроки 00 и 12 ч ВСВ). Это может быть обусловлено наличием больших температурных контрастов именно в зимний период и, особенно, в ночное время, поскольку в холодное полугодие циклоны формировались под влиянием воздушных масс, выходящих с запада и юго-запада на более холодную подстилающую поверхность.

Энергия скрытой теплоты фазовых переходов воды достигала наибольших значений в теплый период, что, возможно, объясняется доступностью дополнительных источников влаги, таких как многочисленные реки и озера, в том числе и ВБ. Зимой же поверхность земли покрыта снегом и льдом, вследствие чего вся влага, участвующая в процессе циклогенеза, имеет адвективное происхождение, то есть она поступает вместе с воздушной массой, смещающейся с запада и юго-запада. На основании всего вышеизложенного напрашивается вывод о том, что энергию скрытой теплоты фазовых переходов воды можно считать одним из предикторов, определяющих процесс местного циклогенеза над исследуемой территорией в теплое полугодие (табл. 1). Поэтому необходим более детальный анализ именно данного вида энергии.

Для определения влияния местных факторов на энергетику различных по району зарождения видов циклонов проведены дополнительные исследования (табл. 2).

**Таблица 2.** Соотношение значений разных видов энергии в циклонах различных групп

**Table 2.** Ratio of values of different types of energy in cyclones of different groups

Вид циклона	Виды энергии							
	Кинетическая энергия, $10^6$ Дж/м <sup>2</sup>		Потенциальная энергия, $10^8$ Дж/м <sup>2</sup>		Внутренняя энергия, $10^9$ Дж/м <sup>2</sup>		Энергия скрытой теплоты фазовых переходов воды, $10^7$ Дж/м <sup>2</sup>	
	ср ( $\sigma$ )	макс	ср ( $\sigma$ )	макс	ср ( $\sigma$ )	макс	ср ( $\sigma$ )	макс
Образовались на севере территории	0,6 (0,3)	0,8	1,2 (0,1)	1,9	0,3 (0,01)	0,4	1,3 (0,3)	0,4
Образовались над Васюганским Болотом	1,6 (0,7)	2,6	1,3 (0,6)	4,0	0,3 (0,2)	0,6	0,4 (0,2)	0,7
Образовались на юге территории	1,6 (0,5)	3,4	1,9 (0,4)	4,0	0,4 (0,1)	0,6	0,3 (0,1)	0,4

Все циклоны были разделены по признаку места их формирования: образовавшиеся на севере территории, образовавшиеся непосредственно над ВБ, а также образовавшиеся на юге обозначенной выше территории.

Практически каждый пятый циклон, формируясь на юге ( $50-54^\circ$  с. ш.,  $60-90^\circ$  в. д.), смещался на север, северо-восток, определяя погодные условия на большей части территории в течение 1 суток. Данные барические образования обладали одними из самых значительных общих запасов энергии и, особенно, запасами потенциальной энергии (среднее  $1,9 \cdot 10^8$  Дж/м<sup>2</sup>, максимальное  $4 \cdot 10^8$  Дж/м<sup>2</sup>). Возможно, это вызвано тем, что они формировались в ложбинах интенсивных основных циклонов, несущих с собой прогретый и влажный воздух с районов Каспийского и Аральского морей и смещающихся на более холодную подстилающую поверхность.

В 19 % случаев циклогенез происходил на севере исследуемой территории. Молодые барические образования, смещаясь на северо-восток, и, задевая крайние северные районы территории, существовали в течение 1 суток и обладали наименьшими общими запасами энергии, особенно кинетической ( $0,6 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>2</sup>).

В течение года более половины из рассмотренных циклонов (62 %) сформировались в центральной части исследуемой территории (54–60° с. ш., 60–90° в. д.) [18]. Заметим, что здесь располагается самое большое в мире ВБ, и над ним развивается 40 % всех циклонов. Это самые глубокие и развитые по вертикали образования (развиваются в среднем до высот 6 км и более), обладающие значительными общими запасами энергии. Перемещались они, в основном, на северо-восток, охватывая более половины рассматриваемой территории и оказывая влияние, в среднем, около 2 дней в холодный период, а в теплое полугодие около 3 суток, при максимальных значениях влияния 4–7 дней. Рельеф этой части исследуемой территории представляет собой переходную зону от низменной болотистой местности (с огромными пространствами занятыми водной поверхностью) к более приподнятой области лесов и лесостепей. За счет этого контраста, дополнительного увлажнения, а также аккумулируемого болотом тепла, могут формироваться циклоны, имеющие наибольшую из рассматриваемых повторяемость и значительную интенсивность. Поэтому представляется актуальным рассмотреть случаи образования циклонов непосредственно над территорией Васюганского Болота.

#### **Параметры атмосферы в дни циклогенеза над Васюганским Болотом**

Выявлено, что около 40 % всех рассматриваемых циклонов получили импульс к развитию непосредственно над территорией ВБ, причем данные барические депрессии обладали значительными запасами энергии, особенно кинетической (среднее  $1,6 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>2</sup>, максимальное  $2,6 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>2</sup>).

Для более детальной оценки вклада энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды в общие запасы энергии, были рассмотрены четыре случая (рис. 1–2) образования местных циклонов (по два случая циклонов, образовавшихся в теплый и холодный периоды года над Васюганьем (23 июля 2015 года и 15 декабря 2016 года) и в других районах территории (27 июля 2015 года и 23 декабря 2016 года) Причем замечено, что наибольшие запасы энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды отмечаются в слое 1000–500 гПа (рис. 1–2), что логично, так как именно в этом слое наблюдается максимальная концентрация атмосферной влаги.

Рассмотрим отдельно циклоны, сформировавшиеся над ВБ.

Первый из рассматриваемых волновых мезовихрей образовался в системе полярного фронта в 15 ч ВСВ 22 июля при регенерации над районами Васюганского Болота старого циклона, смещавшегося с территории

Северного Казахстана и влившегося в ложбину основного циклона с центром над средним Уралом. Наибольшей интенсивности молодой циклон достиг к 12 ч ВСВ 23 июля, минимальное давление в центре составило 1003,1 гПа. Далее произошло окклюдирование основной системы фронтов, и мезовихрь, смещаясь на северо-восток, полностью заполнился над центральными районами Красноярского края к 12 ч ВСВ 24 июля.

Второй волновой циклон сформировался на арктическом фронте в 00 ч ВСВ 15 декабря в передней части ложбины основного циклона, выходившего с районов Северного Казахстана. Минимальное давление в центре вихря составило 1010 гПа. К 03 ч ВСВ 16 декабря, смещаясь на северо-восток, циклон углубился до 995 гПа и достиг стадии максимального развития над районами Киренска ( $58^\circ$  с. ш.,  $108^\circ$  в. д.). Продолжая свое движение далее на северо-восток, вихрь заполнился над территорией Якутии.

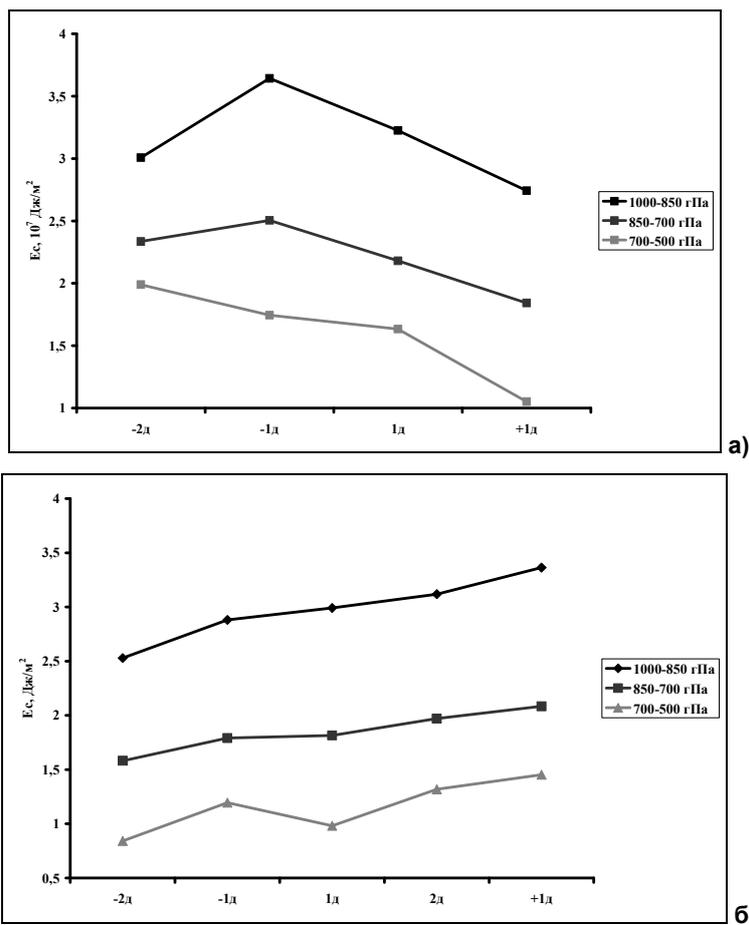
Далее рассмотрим циклоны, сформировавшиеся над Западной Сибирью вне территории Васюганского Болота.

Первый циклон, образовавшийся в 00 ч ВСВ 27 июля, представлял собой двухцентровую депрессию, сформировавшуюся на полярном фронте, один центр которой располагался над районами юга Тюменской области, второй – на юго-востоке Омской области. Данный мезовихрь сформировался в южной части ложбины основного циклона, смещающегося по побережью Карского моря. Минимальное давление в центре молодого циклона составило 994 гПа. Смещаясь на юго-восток, к 00 ч ВСВ 28 июля мезоциклон достиг наибольшей интенсивности (горизонтальный размер с диаметром порядка 1000 км), углубившись на 4,5 гПа. Началось окклюдирование основной системы фронтов. К 00 ч ВСВ 29 июля циклон стал холодным высоким барическим образованием (с ним была связана система вторичных фронтов), располагаясь над районом Омска ( $55^\circ$  с. ш.,  $73^\circ$  в. д.), после чего продолжил свое движение на восток, полностью заполнившись к 12 ч ВСВ 29 июля над территорией Новосибирской области.

Второй из рассмотренных молодых циклонических образований сформировался на волне арктического фронта над северными районами Казахстана, в передней части ложбины основного циклона в 21 ч ВСВ 22 декабря. Минимальное давление в центре составило 1020 гПа. При смещении на северо-восток мезовихрь достиг максимального развития к 12 ч ВСВ 23 декабря (минимальное давление в центре составило 1014 гПа), после чего при дальнейшем движении произошло его полное заполнение к 12 ч ВСВ 24 декабря над районом севера Байкала.

Анализируя график изменения энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды ( $E_c$ ) в теплый период года (рис. 1), можно заметить, что в циклоне, сформировавшемся над Васюганьем, наблюдается накопление  $E_c$  в период, предшествующий зарождению циклона, когда отмечается максимальное значение  $E_c$  ( $3,6 \cdot 10^7$  Дж/м<sup>2</sup>). Уже за день до момента

образования (-1д) непосредственно над территорией болота происходит углубление ложбины и оформление молодого циклона, сопровождающееся выделением дополнительной влаги. Далее при удалении от ВБ (как источника влаги) отмечается равномерный расход энергии на всем протяжении жизни МЦ.



**Рис. 1.** Изменение энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды: местного циклона, образовавшегося над территорией Васюганского Болота 23 июля 2015 г. (а); циклона, образовавшегося над центральными районами территории 27 июля 2015 г. (б)

**Fig. 1.** The latent heat energy of phase transitions of water change: local cyclone formed over the territory of Vasyugan Swamp on July 23, 2015 (a); cyclone formed in the South of the territory on July 27, 2015 (б).

В циклоне, образовавшемся вне территории ВБ, отмечается равномерное увеличение  $E_c$  в течение всего периода жизни МЦ, что, возможно, объясняется наличием влаги адвективного характера и влиянием других

источников. Максимальное значение  $E_c$  достигается к концу жизни мезовихря, когда он полностью заполняется, вливается в ложбину основного циклона (+1д) и составляет  $3,4 \cdot 10^7$  Дж/м<sup>2</sup>.

В холодный период (рис. 2) в циклоне, сформировавшемся над ВБ, так же как и в теплое полугодие, наблюдается накопление  $E_c$  в период, предшествующий зарождению циклона, максимальное значение  $E_c$  ( $0,8 \cdot 10^7$  Дж/м<sup>2</sup>) отмечается в его первый день жизни (1д). Это, возможно, объясняется тем, что в первой половине декабря 2016 года [16] на юге Западной Сибири отмечалась значительная положительная аномалия температуры воздуха (максимальные дневные температуры были в пределах 0; -5 °С). Мягкая погода могла способствовать более позднему замерзанию ВБ и, как следствие, его влиянию на процесс циклогенеза посредством дополнительного выделения влаги открытыми (свободными ото льда) участками болота. Далее при удалении от ВБ отмечается быстрый равномерный расход энергии до момента полного заполнения МЦ (+1д).

В циклоне, образовавшемся вне территории ВБ, максимальное значение  $E_c$  отмечается в течение стадии волны на фронте (-1д) и составляет  $1,7 \cdot 10^7$  Дж/м<sup>2</sup>. Далее наблюдается равномерный расход  $E_c$  в течение всего периода жизни МЦ, что, возможно, объясняется ее преобразованием в процессе движения мезовихря.

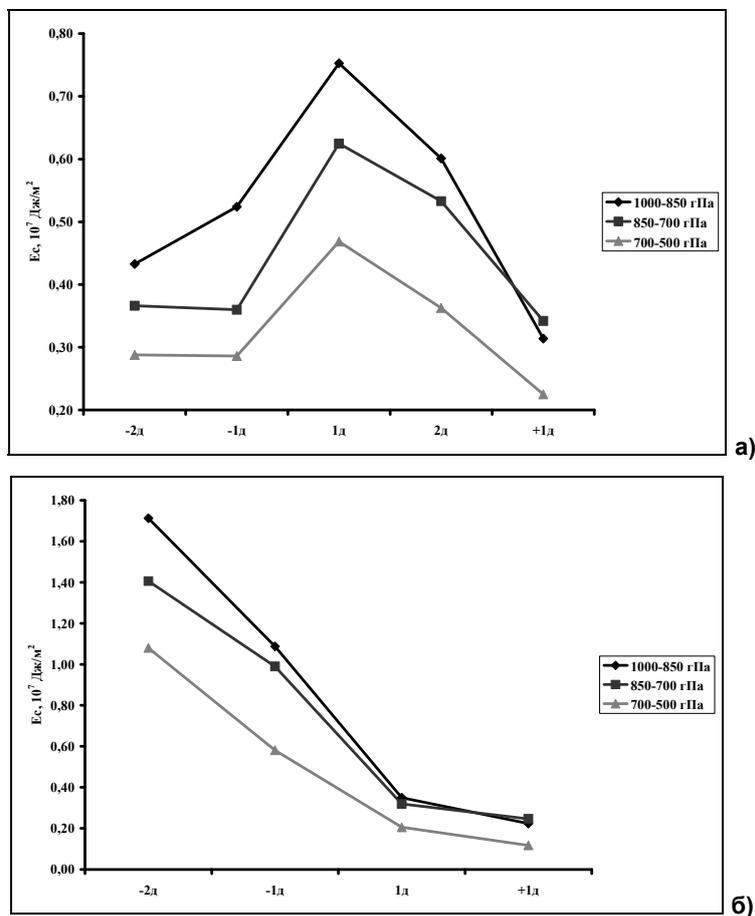
Сравнивая полученные результаты с расчетами для циклонов умеренных широт [13], можно заметить, что от месяца к месяцу запасы энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды  $E_c$  в МЦ значительно уступают аналогичным показателям циклонов большого масштаба и претерпевают значительные изменения ( $0,66$  и  $0,23 \cdot 10^7$  Дж/м<sup>2</sup>, соответственно, в апреле и декабре). В циклонах умеренных широт [13] в течение года существенных изменений рассматриваемого вида энергии не отмечается ( $2,36$  и  $2,62 \cdot 10^7$  Дж/м<sup>2</sup>, соответственно, в апреле и декабре).

#### **В результате исследований получено:**

1. В 40 % случаев циклоны Западной Сибири формируются над территорией Васюганского Болота (ВБ). Это одни из самых глубоких и развитых по вертикали мезовихрей, обладающих значительными запасами всех видов энергии.

2. Наиболее существенные изменения энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды  $E_c$  происходят в слое 1000–500 гПа, так как именно в этом слое наблюдается максимальная концентрация атмосферной влаги.

3. В циклонах, образующихся над Васюганским Болотом в течение всего года, основное накопление энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды  $E_c$  происходит в период появления волны на основном фронте и оформления молодого мезовихря. Далее в процессе движения циклона на восток отмечается расход  $E_c$ .



**Рис. 2.** Изменение энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды: местного циклона, образовавшегося над территорией Васюганского Болота 15 декабря 2016 г. (а); справа – циклона, образовавшегося на юге территории 23 декабря 2016 г. (б).

**Fig. 2.** The latent heat energy of phase transitions of water change: left – local cyclone formed over the territory of Vasyugan Swamp on December 15, 2016 (a); right – cyclone formed in the South of the territory on December 23, 2016 (б).

4. Наибольшие запасы энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды  $E_c$  отмечаются в теплый период года ( $3,6 \cdot 10^7$  Дж/м<sup>2</sup>) и в 4,5 раза превышают аналогичные значения, наблюдающиеся в холодное полугодие (когда влияние Васюганского Болота минимально).

5. Местные циклоны обладают в 4–10 раз меньшими запасами энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды по сравнению с циклонами умеренных широт, что, возможно, связано со значительно меньшими их размерами и сезонными изменениями свойств подстилающей поверхности, над которой они формируются. Циклоны умеренных широт в течение

всего года образуются под влиянием влажных и теплых воздушных масс, приходящих с Атлантики.

6. Васюганское Болото вносит существенный вклад в образование и развитие молодых циклонов, особенно ощутимый в летний период года, когда влияние болот максимально. Так, непосредственно над территорией ВБ происходит так называемая энергетическая «подпитка» и значительное увеличение влагозапаса и конвективного потенциала атмосферы.

7. Энергию скрытой теплоты фазовых переходов воды можно использовать в качестве одного из предикторов, определяющих процесс местного циклогенеза над Васюганьем в теплое полугодие.

Результаты работы могут быть использованы при разработке программно-алгоритмического обеспечения для проведения расчетов вероятности местного циклогенеза в зоне ответственности ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» и его филиалов, а также других структурных подразделений Росгидромета.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 18-45-700010 р\_а.

#### Список литературы

1. Белов П.Н., Переведенцев Ю.П., Гурьянов В.В. Численные методы анализа и прогноза погоды. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1991. 84 с.
2. Борисенков Е.П. Вопросы энергетики атмосферных процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 167 с.
3. Васильев Е.В., Алексеева А.А., Песков Б.Е. Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2009. № 1 С. 5-14.
4. Ветров А.Л. Трансформация доступной потенциальной энергии в циклонах вследствие фазовых переходов воды. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2007. 100 с.
5. Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 360 с.
6. Горбатенко В.П., Войлокова Е.С., Сорокина С.А. Некоторые характеристики конвекции над юго-востоком Западной Сибири в дни с грозой // Материалы Российской конференции «Седьмое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу». Томск: Аграф-Пресс, 2007. С. 49-51.
7. Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Золотухина О.И., Тунаев Е.Л. Термодинамические условия формирования мезомасштабной конвекции в атмосфере Западной Сибири // Известия вузов. Физика. 2011. Том 54, № 11/3. С.148-156.
8. Елисеев А.В. Линейные и нелинейные модели бароклинных волн в атмосфере // Нелинейные волны 2016. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2017. 320 с.
9. Заболотских Е.В., Бобылев Л.П., Дикинис А.В., Неелова Л.О., Смирнова Ю.Е. Особенности формирования и классификация штормовых мезомасштабных вихрей // Ученые записки РГМУ. 2010. № 16. С. 59-76.
10. 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.
11. Калинин Н.А. Динамическая метеорология: учебник. Пермь: Перм. гос. ун-т; СПб.: РГМУ, 2009. 256 с.
12. Калинин Н.А., Лукин И.Л. Генерация доступной потенциальной энергии вследствие притока длинноволновой радиации в атмосфере // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 50-62.
13. Калинин Н.А. Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2015. 308 с.

14. Луценко Э.И. Полярные мезомасштабные циклоны в атмосфере над Баренцевым и Карским морями // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 2 (96) С. 76-89.
15. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. 780 с.
16. Сатина Н.В. Погодные условия на территории Российской Федерации в декабре 2016 года // Метеорология и гидрология. 2017. № 3. С. 128-133.
17. Солдатенко С.А. Синоптические вихри в атмосфере и океане // Соросовский научный журнал. 1999. № 2. С. 78-84.
18. Тунаев Е.Л., Горбатенко В.П., Поднебесных Н.В. Особенности циклогенеза над территорией Западной Сибири за период 1976-2015 гг. // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 364. С. 81-92.
19. Ahmadi-Givi F., Graig G. C. Plant R.S. The Dynamics of a Midlatitude Cyclone with Very Strong Latent-Heat Release // Q. J. Roy Meteor. Soc. 2004. Vol. 130, no. 596. P. 295-323. Doi:10.1256/qj.02.226
20. Charney J.C. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current // J. Meteorol. 1947. No. 4 (5). P. 135-162.
21. Cullather R.I., Bromwich D.H., Serreze M.C. The atmospheric hydrologic cycle over the Arctic basin from reanalyses. Part I. Comparison with observations and previous studies // J. Climate. 2000. Vol. 13, no 5. P. 923-937.
22. Davis K.J. Surface Fluxes of Trace Gases Derived from Convective-Layer Profiles, Ph.D: dissertation. University of Colorado NCAR Cooperative Thesis, 1992. P. 139.
23. Emanuel K.A. An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I. Steady-state maintenance // J. Atmos. Sci. 1986. No. 43. P. 585-604.
24. Emanuel K.A. Atmospheric Convection. New York Oxford: Oxford University Press, 1994. P. 580.
25. Ferreira J.A., Liberato M.L.R., Ramos A.M. On the relationship between atmospheric water vapour transport and extratropical cyclones development // Phys. Chem. Earth. 2016. No. 94. P. 56-65. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.01.001> (дата обращения: 20.05.2018).
26. Fu G., Hiroshi N., Ryuji K., Teruyuki K.A. Polar Low over the Japan Sea on January 1997. Part I. Observational Analysis // Mon. Wea. Rev. 2004. Vol. 132. P. 793-814.
27. Harold J.M., Bigg G.R. Turner J. Mesocyclone activity over the northeast Atlantic / Part 1: Vortex distribution and variability // J. Climatology. 1999. No. 19 (11). P. 1187-1204.
28. Holton J.R. An introduction to dynamic meteorology. // International Geophysics Series. New York; London: Elsevier-Academic Press, 2004. Vol. 88. P. 552.
29. Marques C.A.F., Rocha A., Corte-Real J., Castanheira J.M., Ferreira J., Melo-Goncalves P. Global atmospheric energetics from NCEP-Reanalysis 2 and ECMWF-ERA-40 Reanalysis // Int. J. Climatol. 2009. Vol. 29. P. 159-174.
30. Nolan D.S. What is the trigger for tropical cyclogenesis? // Aust. Meteor. Mag. 2007. No. 56 (4). P. 241-266.
31. Pinto J.R.D., da Rocha R.P. The energy cycle and structural evolution of cyclones over southeastern South America in three case studies // J. Geophys. Res. Atmos. 2011. No. 14. Vol. 116. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1029/2011JD016217> (дата обращения: 15.06.2018).
32. Pirret J.S.R., Knippertz P., Trzeciak T.M. Drivers for the deepening of severe European windstorms and their impacts on forecast quality // Q. J. Roy Meteor. Soc. 2017. No. 143. P. 309-320. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1002/qj.2923> (дата обращения: 15.06.2018).
33. Plu M., Arbogast P.A. Cyclogenesis evolving into two distinct scenarios and its implications for short-term ensemble forecasting // Mon. Wea. Rev. 2005. No. 13. P. 2016-2029.
34. Rasmussen E.A., Turner J. Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 612 p.
35. Simmons A.J., Hoskins B.J. The life cycles of some nonlinear baroclinic waves // J. Atmos. Sci. 1978. No. 35 (3). P. 414-432.
36. Zhu Y., Newell R.E. Atmospheric Rivers and Bombs // Geophys. Res. Lett. 1999. No. 21 (18). P. 1999-2002.

## References

1. *Belov P.N., Perevedentsev Yu.P., Gur'yanov V.V.* Chislennye metody analiza i prognoza pogody. Kazan, Izd-vo Kazan. un-ta, 1991, 84 p. [in Russ.].
2. *Borisenkov E.P.* Voprosy energetiki atmosferynykh protsessov. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1960, 167 p.
3. *Vasil'ev E.V., Alekseeva A.A., Peskov B.E.* Conditions for formation and short-range forecasting of severe squalls. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2009, vol. 34, no. 1, pp. 1-7, DOI: 10.3103/S1068373909010014.
4. *Vetrov A.L.* Transformatsiya dostupnoy potentsial'noy energii v tsiklonakh vsledstvie fazovykh perekhodov vody. Perm', Izd-vo Perm. un-ta, 2007, 100 p. [in Russ.].
5. *Gandin L.S., Kagan R.L.* Statisticheskie metody interpretatsii meteorologicheskikh dannykh. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1976, 360 p. [in Russ.].
6. *Gorbatenko V.P., Voilokova E.S., Sorokina S.A.* Nekotorye kharakteristiki konveksii nad yugo-vostokom Zapadnoy Sibiri v dni s grozoy. Materialy Rossiyskoy konferentsii «Sed'moe sibirskoe soveshchanie po klimato-ekologicheskomu monitoringu». Tomsk, Agraf-Press, 2007, pp. 49-51. [in Russ.].
7. *Gorbatenko V.P., Konstantinova D.A., Zolotukhina O.I., Tunaev E.L.* Termodinamicheskie usloviya formirovaniya mezomasshtabnoy konveksii v atmosfere Zapadnoy Sibiri. *Izvestiya vuz. Fizika [Russian Physics Journal]*, 2011, vol. 54, no. 11/3, pp. 148-156. [in Russ.].
8. *Eliseev A. V.* Lineynye i nelineynye modeli baroklinnykh voln v atmosfere. Nelineynye volny 2016. Nizhniy Novgorod, IPF RAN, 2017, 320 p. [in Russ.].
9. *Zabolotskih E.V., Bobylev L.P., Dikinis A.V., Neelova L.O., Smirnova Yu.E.* Peculiarity of formation and classification of the storm mesoscale eddies. *Uchenye zapiski RGGMU [Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University]*, 2010, no. 16, pp. 59-76. [in Russ.].
10. *Kalinin N. A., Vetrov A. L.* The Generation of Available Potential Energy by Large-Scale Condensation in Middle-Latitude Cyclones. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 2002, vol. 34, no. 1, pp. 17-27. [in Russ.].
11. *Kalinin N.A.* Dinamicheskaya meteorologiya: uchebnik. Perm', Perm State University; Saint-Petersburg, RGGMU, 2009, 256 p. [in Russ.].
12. *Kalinin N.A., Lukin I.L.* Generation of available potential energy due to the long-wave radiation influx in the atmosphere. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, no. 3, pp. 168-177, DOI: 10.3103/S1068373914030054.
13. *Kalinin N.A.* Monitoring, modelirovanie i prognoz sostoyaniya atmosfery v umerennykh shirotakh. Perm', Perm State University Publ., 2015, 308 p.
14. *Lutsenko E.I., Lagun V.E.* Polar meso-scale cyclones in the atmosphere over Barents and Kara seas. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2013, vol. 96, no. 3, pp. 76-89. [in Russ.].
15. *Matveev L.T.* Fizika atmosfery. Saint-Petersburg, Gidrometeoizdat, 2000, 780 p. [in Russ.].
16. *Satina N.V.* Pogodnye usloviya na territorii Rossiiskoi Federatsii v dekabre 2016 goda. *Meteorologiya i gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 2017, no. 3, pp. 128-133.
17. *Soldatenko S.A.* Sinopticheskie vikhri v atmosfere i okeane // Sorosovskiy nauchnyy zhurnal, 1999, no. 2, pp. 78-84. [in Russ.].
18. *Tunaev E.L., Gorbatenko V.P., Podnebesnykh N.V.* Distinctive features of cyclogenesis over the Territory of Western Siberia during 1976–2015. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 364, pp. 81-92.
19. *Ahmadi-Givi F., Graig G. C., Plant R. S.* The Dynamics of a Midlatitude Cyclone with Very Strong Latent-Heat Release. *Q. J. Roy Meteor. Soc.*, 2004, vol. 130, no. 596, pp. 295-323. Doi:10.1256/qj.02.226.
20. *Charney J.C.* The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. *J. Meteorol.*, 1947, no. 4(5), pp. 135–162.
21. *Cullather R.I., Bromwich D.H., Serreze M.C.* The atmospheric hydrologic cycle over the Arctic Basin from reanalyses. Part I. Comparison with observations and previous studies. *J. Climate*, 2000, vol. 13, no 5, pp. 923–937.

22. Davis K.J. Surface Fluxes of Trace Gases Derived from Convective-Layer Profiles, Ph.D: dissertation. University of Colorado NCAR Cooperative Thesis, 1992, pp. 139.
23. Emanuel K.A. An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I. Steady-state maintenance. *J. Atmos. Sci.*, 1986, no. 43, pp. 585-604.
24. Emanuel K.A. Atmospheric Convection. New York Oxford: Oxford University Press, 1994, pp. 580.
25. Ferreira J.A., Liberato M.L.R., Ramos A.M. On the relationship between atmospheric water vapour transport and extratropical cyclones development. *Phys. Chem. Earth.*, 2016, no. 94, pp. 56–65, available at: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.01.001>.
26. Fu G., Hiroshi N., Ryuji K., Teruyuki K. A. Polar Low over the Japan Sea on January 1997. Part I: Observational Analysis. *Mon. Wea. Rev.*, 2004, vol. 132, pp. 793-814.
27. Harold J.M., Bigg G.R. Turner J. Mesocyclone activity over the northeast Atlantic / Part 1: Vortex distribution and variability. *J. Climatology*, 1999, no. 19 (11), pp. 1187–1204.
28. Holton J.R. An introduction to dynamic meteorology. International Geophysics Series New York; London: Elsevier-Academic Press., 2004, vol. 88, pp. 552.
29. Marques C.A.F., Rocha A., Corte-Real J., Castanheira J.M., Ferreira J., Melo-Goncalves P. Global atmospheric energetics from NCEP–Reanalysis 2 and ECMWF–ERA-40 Reanalysis. *Int. J. limatol.*, 2009, vol. 29, pp. 159–174.
30. Nolan D.S. What is the trigger for tropical cyclogenesis? *Aust. Meteor. Mag.*, 2007, no. 56(4), pp. 241–266.
31. Pinto J.R.D., da Rocha R.P. The energy cycle and structural evolution of cyclones over southeastern South America in three case studies. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2011, no. 14, vol. 116, available at: <https://doi.org/10.1029/2011JD016217>.
32. Pirret J.S.R., Knippertz P., Trzeciak T.M. Drivers for the deepening of severe European windstorms and their impacts on forecast quality. *Q. J. Roy Meteor. Soc.*, 2017, no. 143, pp. 309-320. available at: <https://doi.org/10.1002/qj.2923>.
33. Plu M., Arbogast P.A. Cyclogenesis evolving into two distinct scenarios and its implications for short-term ensemble forecasting. *Mon. Wea. Rev.*, 2005, no. 13, pp. 2016-2029.
34. Rasmussen E.A., Turner J. Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. Cambridge, Cambridge University Press, 2003, 612 p.
35. Simmons A. J., Hoskins B. J. The life cycles of some nonlinear baroclinic waves. *J. Atmos. Sci.*, 1978, no. 35 (3), pp. 414–432.
36. Zhu Y., Newell R.E. Atmospheric Rivers and Bombs. *Geophys. Res. lett.* 1999, no. 21 (18), pp. 1999-2002.

Поступила в редакцию 20.08.2018 г.  
Received by the editor 20.08.2018.