

ПРОГНОЗ ОПАСНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПЕРМСКОМ КРАЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛОБАЛЬНЫХ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

А.В. Быков, А.Л. Ветров, Н.А. Калинин

*Пермский государственный национальный
исследовательский университет
meteo@psu.ru*

Введение

В настоящее время развитие информационных технологий и рост вычислительных мощностей позволяют решать все более сложные задачи. Одной из таких задач является моделирование состояния атмосферы с целью прогноза погоды. Для ее решения во многих странах мира разработаны различные прогностические модели, которые постоянно совершенствуются. Одни модели предназначены для исследования атмосферных процессов по всему земному шару, в то время как другие предназначены для прогноза погоды на территории какого-либо региона [1, 6, 7, 12, 13].

Особый интерес представляет прогноз развития кучево-дождевых облаков и связанных с ними опасных метеорологических явлений при помощи современных метеорологических моделей. Для решения данной проблемы в мире используется два основных подхода: 1) использование физико-статистических параметров неустойчивости по данным глобальных прогностических моделей, информация о которых имеется в открытом доступе сети Internet; 2) моделирование конвекции по данным региональных прогностических моделей с высоким пространственным разрешением.

В данной статье представлены результаты прогноза опасных метеорологических явлений, связанных с развитием конвекции,

наблюдавшихся на территории Пермского края в теплый период 2015 года. Для расчетов использовались глобальные прогностические модели NCEP-GFS и CMC-GEM.

Физико-статистические параметры неустойчивости

В мире создано множество различных физико-статистических параметров (индексов, предикторов) неустойчивости [2–4, 9, 12–14, 16, 17, 19], в которых конвективные процессы описываются не напрямую, а косвенно. Это означает, что на основе данных о скорости и направлении ветра, влажности и температуры воздуха на определенных высотах или изобарических поверхностях рассчитываются характеристики, по которым определяется вероятность возникновения того или иного конвективного явления. Большинство индексов разработано для прогноза наличия или отсутствия грозы как комплекса метеорологических явлений, связанных с развитием кучево-дождевых облаков (например, индекс Вайтинга). Некоторые индексы неустойчивости разработаны для прогноза того или иного конвективного опасного метеорологического явления (ОМЯ), когда наличие грозы не обязательно.

Далее рассмотрим только те индексы неустойчивости, градации значений которых включают конвективные ОМЯ. При этом выделим индексы, основанные на

- методе частицы;
 - параметрах ветра на различных высотах или изобарических поверхностях;
 - температурно-влажностных характеристиках атмосферы;
 - комплексе трех первых подходов (комплексные индексы).
- Зачастую формулы для их расчета включают в себя индексы из первых трех групп.

Индексы, основанные на методе частицы

В основе метода частицы лежат формулы, описывающие сухо- и влажноадиабатические процессы. Температура частицы воздуха при адиабатическом подъеме до уровня конденсации изменяется сначала по сухоадиабатическому закону, а выше уровня конденсации – по влажноадиабатическому [5–7].

Индекс плавучести (Lifted Index, LI) [18] является одним из основных критериев статической устойчивости атмосферы и определяется как разность между виртуальной температурой изобарической поверхности 500 гПа и температурой частицы воздуха единичного объема, поднявшейся в этот слой:

$$LI = T'_{500} - T'_{p,500},$$

где T'_{500} – виртуальная температура на изобарической поверхности 500 гПа, °С; $T'_{p,500}$ – виртуальная температура поднявшейся частицы воздуха, °С. При значениях индекса от -6 °С и ниже стоит ожидать развития конвективных ОМЯ.

Индекс LI может рассчитываться для частиц воздуха, поднявшихся от различных изобарических поверхностей, и имеет несколько разновидностей [17]:

– LI, рассчитанный для частицы воздуха, поднявшейся от земной поверхности (Surface Based LI, SB LI);

– LI, рассчитанный для частицы воздуха, поднявшейся от перемешанного слоя (Mixed Layer LI, ML LI). В том слое атмосферы, от которого поднимается частица, усредняются температура и отношение смеси. Чаще всего берется перемешанный слой толщиной 30, 45 и 90 гПа над земной поверхностью. Усреднение необходимо для того, чтобы исключить негативное влияние приземных температуры и влажности;

– LI, рассчитанный для частицы воздуха, поднявшейся от наиболее неустойчивого перемешанного слоя (Most Unstable Planetary Boundary Layer LI, MU PBL LI). Наиболее неустойчивым слоем называется слой с наибольшей эквивалентно-потенциальной температурой (ЭПТ). Чаще всего выбирается наиболее неустойчивый перемешанный слой толщиной 30 гПа в пределах от земной поверхности до высоты 180 гПа над ней.

Потенциальная доступная энергия неустойчивости (Convective Available Potential Energy, CAPE) [18] представляет собой работу, которую потенциально может совершить частица воздуха при адиабатическом подъеме. При значениях CAPE от 2500 Дж/кг и более стоит ожидать развития конвективных ОМЯ. CAPE рассчитывается по формуле:

$$CAPE = g \int_{LFC}^{EL} \frac{T'_p - T'}{T'} dz,$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; T'_p и T' – виртуальная температура окружающей среды и частицы воздуха соответственно, °С; LFC – уровень свободной конвекции, гПа; EL – уровень выравнивания температуры, гПа.

CAPE, аналогично индексу LI, имеет несколько разновидностей [17]:

- CAPE, рассчитанная для частицы воздуха, поднявшейся от земной поверхности (Surface Based CAPE, SB CAPE);

- CAPE, рассчитанная для частицы воздуха, поднявшейся от перемешанного слоя (Mixed Layer CAPE, ML CAPE). В том слое атмосферы, от которого поднимается частица, усредняются температура и отношение смеси. Чаще всего берется перемешанный слой толщиной 30, 45 и 90 гПа над земной поверхностью;

- CAPE, рассчитанная для частицы воздуха, поднявшейся от наиболее неустойчивого перемешанного слоя (Most Unstable Planetary Boundary Layer CAPE, MU PBL CAPE). Чаще всего выбирается наиболее неустойчивый перемешанный слой толщиной 30 гПа в пределах от земной поверхности до 180 гПа над ней;

- CAPE, рассчитанная для частицы воздуха, поднявшейся от наиболее неустойчивого слоя (Most Unstable CAPE, MU CAPE). Чаще всего выбирается наиболее неустойчивый слой в пределах от земной поверхности до 255 или 300 гПа над ней.

Скорость восходящих потоков UVV , м/с, можно приближенно оценить по формуле [14]:

$$UVV = \sqrt{2CAPE}.$$

Кроме перечисленных видов LI и CAPE, существуют также и другие их разновидности: Showalter Index (LI, рассчитанный для частицы, поднявшейся от изобарической поверхности 850 гПа) [20], Normalized CAPE (CAPE, разделенная на толщину конвективно-неустойчивого слоя), Downdraft CAPE (потенциальная энергия нисходящих потоков), Low Level CAPE (CAPE, заключенная в слое толщиной от земли до 255 гПа над ней).

Отдельно стоит отметить энергию противодействия конвекции (Convective Inhibition, CIN) [17, 18]:

$$CIN = g \int_0^{LFC} \frac{T'_p - T'}{T'} dz,$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; T'_p и T' – виртуальная температура окружающей среды и частицы воздуха соответственно, $^{\circ}\text{C}$; LFC – уровень свободной конвекции, гПа.

Энергия противодействия конвекции записывается отрицательным числом. Значения $CIN < -200$ Дж/кг достаточно для прекращения конвекции в атмосфере. CIN имеет разновидности, аналогичные $CAPE$. Малые значения $CAPE$ в сочетании со значительной энергией противодействия конвекции зачастую свидетельствуют о наличии вышележащего конвективно-неустойчивого слоя. Кроме того, такие значения CIN при наличии динамического фактора (например, прохождения быстро движущегося холодного фронта) сигнализируют о возможности развития мезомасштабных конвективных систем (МКС), сопровождающихся ОМЯ.

Индексы, полученные путем расчета параметров ветра на различных высотах или на изобарических поверхностях

Эта группа индексов включает в себя скорость и направление ветра на различных высотах, ветровой сдвиг между двумя слоями атмосферы, скорость и направление ведущего потока (средний ветер в слое между изобарическими поверхностями 850 и 500 гПа), а также вертикальную компоненту скорости ветра на различных изобарических поверхностях.

Сдвиг ветра в нижнем слое (Low level Shear, LLS) [17] предназначен для прогноза линейных МКС (линий шквалов). Сдвиг ветра рассчитывается в слое от земли до 3 км (или толщиной 255 гПа). При значениях индекса 12 м/с и более ожидается возникновение дугообразных долгоживущих систем и линейных скоплений конвективных ячеек.

Глубокий слой сдвига (Deep Layer Shear, DLS) [17] предназначен для прогноза мезоциклонов и высокоорганизованных МКС.

Сдвиг ветра, который в данном индексе измеряется в узлах, рассчитывается от земли до высоты 6 км (или до изобарической поверхности 450 гПа). При значениях индекса 40 узлов и более ожидается развитие мезоциклонов.

Относительная завихренность шторма (Storm Relative Helicity, SRH) [19] вычисляется по формуле:

$$SRH = -\int_0^h \bar{k}(\bar{v}(z) - \bar{c}) \times \frac{\partial \bar{v}(z)}{dz} dz,$$

где \bar{k} – вертикальная компонента вектора скорости ветра у земли, м/с; $\bar{v}(z)$ – горизонтальная составляющая вектора скорости ветра на высоте z , м/с; \bar{c} – вектор ведущего потока, м/с.

В зависимости от высоты интегрирования h индекс SRH может быть применен для разных целей. Если рассчитывать индекс в слое 3 км от земли (или толщиной 255 гПа), то при его значениях $150 \text{ м}^2/\text{с}^2$ и более стоит ожидать возникновения штормов с вращением; если рассчитывать индекс до высоты 1 км (или толщиной 90 гПа), то при его значениях $75 \text{ м}^2/\text{с}^2$ и более есть условия для возникновения смерчей.

Индексы, основанные на расчете температурно-влажностных характеристик атмосферы

Индекс Вайтинга (K Index) [15] рассчитывается по формуле:

$$K = T_{850} - T_{500} + Td_{850} - DD_{700},$$

где T_{850} и T_{500} – температура воздуха на изобарических поверхностях 850 и 500 гПа соответственно, °С; Td_{850} – температура точки росы на изобарической поверхности 850 гПа, °С; DD_{700} – дефицит точки росы на изобарической поверхности 700 гПа, °С.

При значениях индекса 40 и более стоит ожидать развития конвективных ОМЯ. Также существует модификация индекса Вайтинга, в которой вместо температуры воздуха и точки росы на изобарической поверхности 850 гПа взяты температуры воздуха и точки росы у земли.

Индекс потенциальной неустойчивости (EPI) [17] оценивает стратификацию в средней тропосфере как разность эквивалентно-потенциальной температуры Θ_e ($^{\circ}\text{C}$) на изобарических поверхностях 500 и 850 гПа:

$$EPI = \Theta_{e,500} - \Theta_{e,850}.$$

Нулевые и отрицательные значения индекса указывают на значительную неустойчивость в средней тропосфере и наличие благоприятных условий для развития МКС.

Кроме указанных индексов, широко применяются также Total Totals Index (применяется для прогноза наличия потенциала для развития конвекции) и его разновидности, а также основанный на нем S Index (для прогноза вероятности грозы). Реже применяются Boyden Index (для прогноза зимних гроз), TQ Index (для оценки потенциала для развития конвекции в среднем слое тропосферы), KO Index, Rackliff Index и другие.

Комплексные индексы неустойчивости

Отдельную группу индексов неустойчивости составляют комплексные предикторы, представляющие собой комбинацию перечисленных выше трех подходов для учета сразу нескольких факторов для развития конвекции. С практической точки зрения такой подход является наиболее приемлимым для прогноза МКС, так как для их развития необходимо сочетание неустойчивости атмосферы со сдвигом ветра и различными динамическими факторами.

Индекс глубокой конвекции (Deep Convective Index, DCI) [17] объединяет в себе температуру воздуха T_{850} ($^{\circ}\text{C}$) и точку росы Td_{850} ($^{\circ}\text{C}$) на изобарической поверхности 850 гПа и Surface Based Lifted Index:

$$DCI = T_{850} + Td_{850} - SBLI.$$

При значениях DCI 30 и более ожидается развитие конвективных ОМЯ. Так как МКС могут возникать при наличии конвективных течений не только от земли, но и от вышележащих слоев атмосферы, целесообразно использовать индекс плавучести для наиболее неустойчивого перемешанного слоя:

$$DCI = T_{850} + Td_{850} - MULI_{PBL,0-180}.$$

Индекс Томпсона (Thompson Index, TI) [21] состоит из композиции K Index и Lifted Index. При тестировании индекса над территорией США была получена связь конвективных ОМЯ и значений индекса 40 и более. По аналогии с DCI для расчета целесообразно использовать MULI:

$$TI = K - MULI_{PBL,0-180}.$$

Комплексный параметр для прогноза мезоциклона (Supercell Composite Parameter, SCP) [21] включает в себя CAPE, DLS и SRH, что позволяет оценивать сразу несколько факторов, необходимых для образования мезоциклона: термическую неустойчивость, ветровой сдвиг и динамический фактор в виде относительной завихренности:

$$SCP = \frac{MUCAPE_{PBL,0-180}}{1000} \frac{SRH_{0-255}}{150} \frac{DLS^2}{60}.$$

Значения индекса от 1 и более указывают на наличие условий для развития мезоциклонов. При значениях индекса 4 и более появляется вероятность того, что вместо мезоциклона может развиться дугообразная долгоживущая система с сильными ветрами.

Индекс мезомасштабных конвективных систем (Mesoscale Convective Systems Index, MCS) [17] также включает в себя несколько разнородных параметров: Lifted Index, сдвиг ветра в нижнем слое и адвекцию тепла TA_{700} , °C·м/с на изобарической поверхности 700 гПа:

$$MCS = \frac{MULI_{PBL,0-180} + 4.4}{3.3} + \frac{LLS_{0-255}}{5} + \frac{TA_{700} + 4.5 \times 10^{-5}}{7.3 \times 10^{-5}}.$$

При неотрицательных значениях индекса следует ожидать развития МКС.

Индекс угрозы опасной погоды (Severe Weather ThrEAT Index) [18] включает в себя четыре параметра:

$$SWEAT = a + b + c + d.$$

Параметр a определяется следующим образом:

$$a = 12Td_{850},$$

где Td_{850} – температура точки росы на изобарической поверхности 850 гПа, °С.

Параметр b характеризует неустойчивость воздушной массы в средней тропосфере:

$$b = 20(TT - 49),$$

где TT – Total Totals Index:

$$TT = T_{850} + Td_{850} - 2T_{500},$$

где T_{850} и T_{500} – температура на изобарических поверхностях 850 и 500 гПа соответственно, °С; Td_{850} – температура точки росы на изобарической поверхности 850 гПа, °С.

Параметр $b = 0$ при $TT < 49$.

Параметр c характеризует сдвиг ветра:

$$c = 2\vec{v}_{850} - \vec{v}_{500},$$

где \vec{v}_{850} и \vec{v}_{500} – векторы скорости ветра на изобарических поверхностях 850 и 500 гПа соответственно (в узлах).

С помощью параметра d можно оценить потенциал для вращательных движений в конвективных облаках:

$$d = 125(\sin(WD_{500} - WD_{850}) + 0,2),$$

где WD_{500} и WD_{850} – направление ветра (в градусах).

Параметр $d = 0$ при $WD_{500} - WD_{850} > 0$.

Таким образом, индекс SWEAT включает в себя четыре различных фактора, благоприятствующих развитию МКС с конвективными ОМЯ, которых стоит ожидать при значениях индекса 250 и более. Индекс был разработан Миллером в 1979 году для прогноза опасной погоды на территории Европы [18] и широко используется в настоящее время.

Вертикальная конвергенция влаги (Vertically Integrated Moisture Flux Convergence, VIMFC) [17] оценивает сходимость потоков в нижней тропосфере; положительные значения индекса свидетельствуют о крупномасштабном подъеме влажного воздуха, благоприятном для развития МКС:

$$VIMFC = \int_{P_0}^{700} \left(\frac{duq}{dx} + \frac{dvq}{dy} \right) \cdot \left(10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2} \right),$$

где P_0 – приземное давление, гПа; u и v – горизонтальные компоненты скорости ветра, м/с; q – массовая доля водяного пара, кг/кг. VIMFC используется в сочетании с MU LI, который должен быть неотрицателен.

Существуют также комплексные индексы прогноза отдельных ОМЯ, таких как град, смерчи и т. п. В данной работе эти параметры не используются, но представляют определенный интерес для будущих исследований.

Параметр для сильных смерчей (Significant Tornado Parameter) [21] используется для прогнозирования смерчей категории F2 и выше по шкале Фуджиты-Пирсона. STP включает в себя глубокий слой сдвига, относительную завихренность в слое 0–90 гПа над поверхностью земли, энергию неустойчивости для перемешанного приземного слоя толщиной 90 гПа и уровень конденсации LCL, гПа, для частицы, адиабатически поднявшейся от него:

$$STP = \frac{DLS}{20} \frac{SRH_{0-90}}{100} \frac{MLCAPE_{0-90}}{1000} \frac{2000 - LCL_{ML,0-90}}{1500}.$$

Смерчи следует ожидать при значениях индекса от 1 выше. Существует также редакция индекса, основанная на Surface Based CAPE и CIN [19]:

$$STP = \frac{DLS}{20} \frac{SRH_{0-90}}{100} \frac{SBCAPE}{1500} \frac{2000 - LCL_{SB}}{1500} \frac{100 + SBCIN}{150}.$$

Параметр для крупного града (Significant Nail Parameter) [21] используется для прогноза града диаметром 2 см и более. Параметр определяется по формуле:

$$SHIP = \frac{-MUCAPE_{0-255} q_{MU,0-255} \gamma_{500-700} T_{500} DLS}{44 \cdot 10^{-6}},$$

где $q_{MU,0-255}$ – массовая доля водяного пара частицы воздуха, поднявшейся от наиболее неустойчивого слоя, кг/кг; $\gamma_{500-700}$ –

средний градиент температуры между изобарическими поверхностями 500 и 700 гПа, °С, T_{500} – температура на изобарической поверхности 500 гПа, °С.

Обзор опасных метеорологических явлений конвективного происхождения в теплый период 2015 года

Данные о конвективных ОМЯ были взяты из находящейся в свободном доступе в сети Internet базы данных ОМЯ, произошедших на территории Пермского края с 1990 года по настоящее время [11].

В табл. 1 приведены данные о 13 ОМЯ, зафиксированных в теплый период 2015 года. Критерии ОМЯ были взяты из Наставления [8].

Таблица 1

Опасные метеорологические явления конвективного происхождения, зафиксированные на территории Пермского края в теплый период 2015 года

Дата	Место регистрации	Явление
1.06	Гидропост Усть-Пожва	Очень сильный дождь, 53 мм/12ч
2.06	Гидропост Усьва	Очень сильный дождь, 92 мм/12ч
16.06	Усольский район	Шквал, нет данных об интенсивности
20.06	Город Кунгур	Крупный град, до 3 см в диаметре
21.06	Метеостанция Кын	Очень сильный дождь, 45 мм/12ч
22.06	Метеостанция Добрянка	Сильный дождь, 33 мм/12ч
24.06	Город Пермь	Шквал, нет данных об интенсивности
25.06	Метеостанция Губаха	Очень сильный дождь, 117 мм/12ч
25.06	Метеостанция Бисер	Очень сильный дождь, 30 мм/12ч
25.06	Гидропост Усьва	Очень сильный дождь, 53 мм/12ч
25.06	Гидропост Верхне-Чусовские городки	Очень сильный дождь, 55 мм/12ч
29.06	Гидропост Кува	Очень сильный дождь, 53 мм/12ч
29.06	Метеостанция Кудымкар	Сильный дождь, 40 мм/12ч
12.07	Метеостанция Оханск	Сильный дождь, 44 мм/12ч
12.07	Оханский район	Смерч, нет данных об интенсивности
12.07	Метеостанция Чернушка	Шквал, 28 м/с

Стоит отметить, что для метеостанций и гидропостов, находящихся в горной части Пермского края (Кын, Бисер), критерием для ОМЯ «очень сильный дождь» является 30 мм/12 ч. Также в табл. 1 приведены сведения о 3 случаях выпадения сильных дождей (22.06, 29.06 и 12.07), нанесших большой экономический ущерб и представляющих большой интерес для прогноза.

Таким образом, в 2015 году произошло 16 конвективных явлений, из них 12 зарегистрировано по данным наблюдательной сети, 3 по свидетельствам очевидцев и 1 по данным космического мониторинга (табл. 1). Все конвективные явления произошли при различных типах синоптических ситуаций. Во всех случаях ОМЯ были сгенерированы мезомасштабными конвективными системами масштаба мезо- α и мезо- β [5].

Глобальные прогностические модели, используемые для анализа индексов неустойчивости

Модель GFS [10] (Global Forecast System) разработана в NCEP (National Centers for Environmental Prediction), США. Модель использует редуцированную широтно-долготную сетку с разрешением около 13 км по горизонтали. Прогноз рассчитывается на 10 суток, формат выходных данных – GRIB-2. Расчет прогноза осуществляется 4 раза в сутки. Файлы счета модели доступны с разрешением 0,25, 0,5, 1 и 2,5° и шагом по времени 3 ч.

Модель GEM [10] (Global Environment Multiscale) разработана в CMC (Canadian Meteorological Center), Канада. Модель использует сетку Yin-Yang с разрешением около 25 км по горизонтали. Прогноз рассчитывается на 10 суток, формат выходных данных – GRIB-2. Расчет прогноза осуществляется два раза в сутки. Файлы счета модели доступны с разрешением 0,24 и 0,6° и с шагом по времени 3 ч.

Для получения модельных данных и их автоматической обработки были написаны сценарии для операционной системы Linux. Расчет индексов неустойчивости производился автоматически в программном комплексе OpenGrADS, предназначенном для визуализации метеорологических данных в кодах GRIB, DODS, NetCDF и др. OpenGrADS позволяет визуализировать метеоданные

в различных форматах: графическом (PNG, PDF, JPEG, BMP и др.), геопространственном (векторные и растровые файлы для чтения в геоинформационных системах) и текстовом. Для написания сценариев OpenGrADS обладает встроенным языком программирования, позволяющим значительно расширять его функциональные возможности. Кроме того, язык сценариев обладает мощным математическим аппаратом, что позволяет рассчитывать сложные физические величины.

Значительную сложность представляет реализация расчета температуры поднимающейся частицы (для индексов LI и CAPE). Алгоритм GAMMA-W вычисления LI и CAPE находится в открытом доступе и реализован на языке Python. Данный алгоритм был адаптирован для сеточных данных в среде OpenGrADS.

Оценка качества прогноза конвективных ОМЯ с использованием индексов неустойчивости по данным моделей GFS и GEM

Для оценки выбраны 17 индексов неустойчивости, перечисленных выше, за исключением индекса VIMFC, так как он оценивает потенциал для развития глубокой конвекции и не предназначен для прогноза конвективных ОМЯ. Индекс SRH рассчитывался для слоя толщиной 255 гПа. Вначале для территории Пермского края выделялись зоны с благоприятными условиями для развития конвекции. Эти зоны находились при значениях $VIMFC > 0$ и $MULI_{PBL,0-180} < 0$. Индексы неустойчивости рассчитывались в точках с максимальными значениями VIMFC. Использовался модельный прогноз от 0 ч ВСВ. Расчет проводился с шагом по времени 3 ч и заблаговременностью до 27 ч. Прогноз опасного явления считался оправдавшимся, если оно было зафиксировано на территории радиусом 50 км от точки и отклонением от прогноза по времени не более 3 ч. Для расчета были взяты модели со сходным пространственным и временным разрешением: NCEP-GFS и CMC-GEM.

По расчетам прогностических моделей благоприятные условия для развития глубокой конвекции были гораздо чаще, чем наблюдались ОМЯ, 106 по данным модели GEM и 100 по данным

модели GFS. Для каждого случая наличия благоприятных условий для конвекции были рассчитаны значения индексов неустойчивости.

Далее были рассчитаны следующие характеристики оправдываемости прогноза конвективных ОМЯ [4].

Общая оправдываемость ОЯ:

$$Ac_G = \frac{ts_{11} + ts_{22}}{ts_{00}} 100\% ,$$

где ts_{11} – число оправдавшихся прогнозов ОЯ; ts_{22} – число оправдавшихся прогнозов отсутствия ОЯ; ts_{00} – общее число прогнозов наличия ОЯ.

Оправдываемость наличия ОЯ:

$$Ac = \frac{ts_{11}}{ts_{10}} 100\% ,$$

где ts_{10} – число прогнозов наличия ОЯ.

Предупрежденность наличия ОЯ:

$$W = \frac{ts_{11}}{ts_{01}} 100\% ,$$

где ts_{01} – число случаев ОЯ.

Оправдываемость отсутствия ОЯ:

$$Ac_{no} = \frac{ts_{22}}{ts_{20}} 100\% ,$$

где ts_{20} – число прогнозов отсутствия ОЯ.

Предупрежденность отсутствия ОЯ:

$$W_{no} = \frac{ts_{22}}{ts_{02}} 100\% ,$$

где ts_{02} – число случаев отсутствия ОЯ.

Критерий Пирса-Обухова:

$$T = \frac{ts_{11}}{ts_{01}} - \frac{ts_{12}}{ts_{02}} ,$$

где ts_{12} – число неоправдавшихся прогнозов наличия ОЯ.

По модели GEM (табл. 2) наилучшие значения критерия Пирса-Обухова отмечены у Thompson Index (0,27). Этот индекс показал 100 % оправдываемости отсутствия и предупрежденности наличия ОМЯ, т. е. не пропустил ни одного опасного явления, но при этом индекс имеет низкую общую оправдываемость (0,35). Более низкие значения критерия у ML LI (0,2), SRH (0,14), SB CAPE (0,13) и MU CAPE (0,13); этим индексам характерны высокие значения общей оправдываемости и оправдываемости отсутствия ОЯ в сочетании с низкой оправдываемостью наличия явления. Высокие значения предупрежденности наличия ОЯ (0,92) отмечены у K Index и EPI при относительно низких значениях критерия Пирса-Обухова (0,07 и 0,01 соответственно).

Таблица 2

Значения параметров оправдываемости индексов неустойчивости по данным модели CMC-GEM

Индекс	Ac_G	Ac	W	Ac_{no}	W_{no}	T
SB CAPE	0,75	0,17	0,33	0,9	0,8	0,13
ML CAPE	0,89	0	0	0,89	1	0
MU PBL CAPE	0,83	0,2	0,17	0,9	0,91	0,08
MU CAPE	0,75	0,17	0,33	0,9	0,8	0,13
LI	0,58	0,13	0,5	0,9	0,59	0,09
ML LI	0,87	0,38	0,25	0,91	0,95	0,2
MU PBL LI	0,67	0,1	0,25	0,88	0,72	-0,03
EPI	0,19	0,11	0,92	0,9	0,1	0,01
K	0,24	0,12	0,92	0,93	0,15	0,07
DCI	0,52	0,13	0,58	0,91	0,51	0,09
MCS	0,69	0,04	0,08	0,87	0,77	-0,15
DLS	0,82	0	0	0,88	0,93	-0,07
LLS	0,63	0,06	0,17	0,87	0,69	-0,14
SRH	0,72	0,13	0,25	0,89	0,78	0,03
SCP	0,62	0,15	0,5	0,91	0,64	0,14
SWEAT	0,32	0,09	0,58	0,84	0,29	-0,13
TI	0,35	0,15	1	1	0,27	0,27

По модели GFS (табл. 3) наилучшие значения критерия Пирса-Обухова отмечены у индексов SRH (0,31), MCS (0,24), MUCAPE (0,23), CAPE (0,23) при низких значениях оправдываемости наличия явления. Оправдываемость наличия грозы 100 % при относительно низких значениях критерия Пирса-Обухова имеют индексы EPI (0,06), K (0,06), TI (0,18). Также относительно высокие значения предупредженности наличия ОМЯ имеет индекс SWEAT (0,92).

Таблица 3

Значения параметров оправдываемости индексов неустойчивости по данным модели NCEP-GFS

Индекс	A_{CG}	A_c	W	$A_{c_{no}}$	W_{no}	T
SB CAPE	0,83	0,31	0,33	0,91	0,9	0,23
ML CAPE	0,88	0	0	0,88	1	0
MU PBL CAPE	0,86	0	0	0,88	0,98	-0,02
MU CAPE	0,83	0,31	0,33	0,91	0,9	0,23
LI	0,53	0,13	0,5	0,89	0,53	0,03
ML LI	0,8	0,21	0,25	0,9	0,88	0,13
MU PBL LI	0,64	0,13	0,33	0,88	0,68	0,02
EPI	0,17	0,13	1	1	0,06	0,06
K	0,17	0,13	1	1	0,06	0,06
DCI	0,54	0,16	0,67	0,92	0,52	0,19
MCS	0,52	0,17	0,75	0,93	0,49	0,24
DLS	0,87	0,33	0,08	0,89	0,98	0,06
LLS	0,64	0,07	0,17	0,86	0,7	-0,13
SRH	0,77	0,26	0,5	0,92	0,81	0,31
SCP	0,55	0,13	0,5	0,89	0,56	0,06
SWEAT	0,29	0,14	0,92	0,95	0,2	0,12
TI	0,28	0,14	1	1	0,18	0,18

Заключение

1. По результатам расчета индексов неустойчивости с использованием выходных данных моделей GEM и GFS можно сделать вывод о том, что наилучшими из них являются индексы Томпсона

и Вайтинга и индекс потенциальной неустойчивости. При значениях этих индексов, не превышающих критические, развитие конвективных ОМЯ маловероятно. Однако, эти индексы имеют высокий процент ложных тревог. Кроме того, модель GFS лучше подходит для прогноза конвективных ОМЯ, чем GEM.

2. Индекс MU CAPE в ситуациях со слабым динамическим фактором развития конвекции имеет хорошую предупредительность развития ОМЯ по обеим моделям. Однако, по данным модели GEM этим индексом следует пользоваться с осторожностью, так как завышенные значения приземной влажности, свойственные данной модели, зачастую приводят к завышению значений данного параметра. Отчасти негативное влияние завышенной приземной влажности устраняется при помощи индексов ML CAPE и MU PBL CAPE, но эти индексы не подходят для прогнозирования опасных конвективных явлений (возможно, пороговое значение для этих индексов завышено).

3. Стоит отметить высокую предупредительность ОЯ с помощью индексов MCS, SRH и SWEAT для ситуаций со значительным динамическим фактором по модели GFS.

4. Не обнаружена связь между наблюдавшимися ОЯ и индексами LI, ML LI, MU PBL LI, ML CAPE, MU PBL CAPE, LLS.

Летом 2015 года условия для развития интенсивной конвекции наблюдались реже, чем обычно. Таким образом, в дальнейшем будут продолжены исследования на большем объеме выборки за счет последующих теплых сезонов.

Также в настоящий момент ведется разработка нового комплексного индекса неустойчивости, основанного на глубокой модификации MU PBL LI. К исследованию привлечена отечественная модель ПЛАВ, используемая Гидрометцентром России и Институтом вычислительной математики РАН [10]. Выходные данные модели схожи с двумя исследуемыми по пространственному разрешению ($0,18^\circ \times 0,225^\circ$) и в настоящий момент модель готова к использованию (данные счета автоматически поступают на ftp-сервер Пермского государственного национального исследовательского университета). Кроме того, перспективным направлением решения задачи прогноза конвективных ОМЯ является их непосредственное моделирование с использованием мезомасштабных

прогностических моделей с высоким горизонтальным разрешением (1–4 км).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №16-45-590823 p_a).

Список использованных источников

1. *Ветров А.Л., Шихов А.Н.* Анализ условий развития и оценка последствий сильных шквалов в Прикамье 18 июля 2012 года // Вестник Удмуртского Университета. Сер. 6. Биология, Науки о Земле. – 2013. – № 2. – С. 89–99.

2. *Горбатенко В.П., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю., Нечепуренко О.Е.* Сравнение индексов неустойчивости атмосферы, восстанавливаемых по данным радиозондирования и спектрорадиометра MODIS в дни с грозами, над территорией Западной Сибири // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 5. – С. 10–19.

3. *Губенко И.М., Рубинштейн К.Г.* Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 1. – С. 27–37.

4. *Губенко И.М., Рубинштейн К.Г.* Пример сравнения индексов неустойчивости средней тропосферы в прогностической модели с информацией о грозовой активности // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 5. – С. 40–53.

5. *Калинин Н.А.* Динамическая метеорология: учебник: изд 2-е, испр. – Пермь: Перм. кн. изд-во, 2009. – 256 с.

6. *Калинин Н.А.* Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах: монография. – Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2015. – 308 с.

7. *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.

8. *Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения.* РД 52.27.724-2009. – М.: Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. – 50 с.

9. *Новицкий М.А., Шмерлин Б.Я., Петриченко С.А., Терёб Л.А., Кулижникова Л.К., Калмыкова О.В.* Использование индексов конвективной неустойчивости и метеорологических величин для анализа смерчопасной ситуации в Обнинске 23 мая 2013 г. // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 2. – С. 13–20.

10. Толстых М.А. Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып. 359. – С. 5–32.
11. Шихов А.Н. Быков А.В. База данных об опасных и неблагоприятных явлениях погоды в Пермском крае как региональный аналог ESWD // Географический вестник. – 2014. – № 4. – С. 102–109.
12. Шихов А.Н. Быков А.В. Изучение двух случаев сильных смерчей в Предуралье // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12, № 3. – С. 124–133.
13. Шихов А.Н. Быков А.В. Оценка качества прогноза мезомасштабных конвективных систем на Западном Урале с помощью модели WRF и спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 1. – С. 137–148.
14. Doswell C.A. and Shultz D.M. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms // Electronic J. Severe Storms Meteorology. – 2006. – Vol. 1, No. 3. – P. 122.
15. George. J.J. Weather Forecasting for Aeronautics. – New York; London: Academic Press, 1960. – 684 p.
16. Jedlovec G.J., Nair U., Haines S.L. Detection of storm damage tracks with EOS data // Weather and Forecasting. – 2006. – Vol. 21. – P. 249–267.
17. Jurgen Gracier. Convection parameters. – URL: <http://www.juergen-grieser.de/ConvectionParameters/ConvectionParameters.pdf> (дата обращения 24.06.2016).
18. Miller R.C. Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central // AFGWC Tech. Rep. 200 (Rev.). – Scott AFB, IL. – 1972. – 190 p.
19. Rasmussen E.N., Blanchard D.O. A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters // Weather and Forecasting. – 1998. – No. 13. – P. 1148–1164.
20. Showalter A.K. A stability index for forecasting thunderstorms // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 1947. – No. 34. – P. 250–252.
21. Thompson R.L., Edwards R., Hart J.A., Elmore K.L., Markowski P. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle // Weather and Forecasting. – 2003. – No. 18. – P. 1243–1261.

Поступила в реакцию 30.11.2016 г.