

УДК 551.501.776:551.576

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ КОНВЕКЦИИ В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В КУЧЕВО-ДОЖДЕВОМ ОБЛАКЕ

¹Неижмак А.Н., ²Расторгуев И.П.

¹ФГКВБОУ ВО «Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков
имени Героя Советского Союза А.К. Серова», Краснодар, e-mail: kubanec@inbox.ru;

²ФГКВБОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, e-mail: iprastor@yandex.ru

В статье рассматривается возможность использования адиабатической модели конвекции применительно к задаче нахождения высот расположения изотермических уровней в облачности вертикального развития. Описаны материалы исследования. В качестве исходного материала использовались две независимые выборки высот расположения изотерм 0 °С, -10 °С и -20 °С. Архивные выборки получены для центра европейской части России. Как основной использовался физико-статистический метод исследования. Анализ изменчивости фактических высот расположения изотерм показал нецелесообразность использования осредненных данных. Сравнение с данными стандартной атмосферы привело к таким же выводам. В статье подробно описана математическая модель, используемая в исследовании. Указанная модель адаптирована к наличию различных наборов исходных данных. Приведен ход проводившихся вычислений. Испытание предложенного подхода к оценке высот расположения изотермических уровней в конвективной облачности осуществлено на двух независимых выборках. В качестве эталона рассматривались данные контактного температурного радиозондирования атмосферы. Представленные графики демонстрируют факт занижения расчетных высот изотерм относительно фактических. Данная картина характерна для всех трех рассматриваемых изотермических уровней. Также проиллюстрированы отклонения рассчитанных величин от фактических. Количественная оценка адекватности рассматриваемой модели проведена по показателям, указанным в руководящем документе. Рассчитанные статистические характеристики дают возможность оценить адекватность, точность и устойчивость получаемых результатов. Их анализ позволил сделать вывод о том, что предлагаемый способ работоспособен, но из-за наличия отдельных существенных ошибок рекомендуется в качестве консультативного. Дальнейшее развитие исследования видится в рассмотрении других, более сложных моделей конвекции.

Ключевые слова: изотерма, кучево-дождевое облако, модель конвекции, опасность, температурный градиент, стандартная атмосфера, ошибка

ASSESSING THE ADEQUACY OF MODELS OF CONVECTION IN THE PROBLEM OF DETERMINING THE TEMPERATURE IN A CUMULONIMBUS CLOUD

¹Neizhmak A.N., ²Rastorguev I.P.

¹Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots named after Hero
of the Soviet Union A.K. Serov, Krasnodar, e-mail: kubanec@inbox.ru;

²Military Training and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy
named after professor N.E. Zhukovskij and Yu.A. Gagarin», Voronezh, e-mail: iprastor@yandex.ru

The article discusses the possibility of using adiabatic convection model in relation to the problem of finding the heights of isothermal levels in the clouds of vertical development. The research materials are described. Two independent samples of 0 °C, -10 °C and -20 °C isotherms location heights were used as a starting material. Archival samples were obtained for the center of the European part of Russia. As the main physical and statistical method of research was used. Analysis of the variability of the actual heights of the isotherms showed the inexpediency of using averaged data. Comparison with the standard atmosphere data led to the same conclusions. The article describes in detail the mathematical model used in the study. This model is adapted to the availability of different sets of input data. The course of calculations is given. The proposed approach to estimating the heights of isothermal levels in convective clouds was tested on two independent samples. The data of contact temperature radiosounding of the atmosphere were considered as a reference. The presented graphs demonstrate the fact of underestimation of the calculated heights of the isotherms relative to the actual. This pattern is typical for all three considered isothermal levels. Deviations of calculated values from actual values are also illustrated. The quantitative assessment of adequacy of the considered model is carried out on the indicators specified in the governing document. The calculated statistical characteristics make it possible to assess the adequacy, accuracy and stability of the results. Their analysis led to the conclusion that the proposed method is workable, but due to the presence of some significant errors, it is recommended as an Advisory. Further development of the study is seen in the consideration of other, more complex convection models.

Keywords: isotherm, cumulonimbus cloud, convection model, hazard, temperature gradient, standard atmosphere, error

Решение некоторых задач обеспечения безопасности полетов требует знания высот расположения определенных температурных уровней в атмосфере, в том числе внутри облаков, особенно кучево-дождевых [1].

Наиболее точную информацию о распределении температуры по высотам в атмосфере можно получить при помощи вертикального температурно-ветрового зондирования. Поднимающиеся в свобод-

ном полете датчики температуры и влажности с достаточной точностью регистрируют указанные параметры [2].

Однако сеть радиозондировочных пунктов разрежена, запуски радиозондов дорогостоящи и осуществляются в фиксированные моменты времени два раза в сутки, что существенно снижает ценность информации температурного зондирования для оперативной оценки возможности грозообразования и вероятности обледенения в кучево-дождевой облачности.

Для определения высоты расположения изотермы 0°C разработана методика [3], основанная не на контактном измерении температуры в облачности, а базирующаяся на регистрации с помощью искусственного спутника Земли радиационной температуры верхней границы облачности и на информации о температуре воздуха у поверхности земли. Результаты, полученные при помощи данной методики, сопоставимы с данными температурно-ветрового зондирования, но указанный подход позволяет оценить высоту расположения только уровня 0°C .

Следовательно, необходим поиск новых путей получения информации о распределении температуры по высотам в кучево-дождевой облачности.

Известны адиабатические и неадиабатические модели конвекции. К числу адиабатических относят модель частицы. Согласно данной модели перегретый относительно окружающего объема воздуха поднимается под действием силы Архимеда по сухоадиабатическому закону. Температура рассматриваемого объема воздуха уменьшается благодаря адиабатическому расширению. После достижения уровня конденсации, где начинается образование облачных элементов, охлаждение происходит медленнее за счет выделяющейся теплоты конденсации. Воздействие силы плавучести и в результате подъема воздуха происходят до момента выравнивания температур поднимающегося и окружающего воздуха. Этот уровень называется уровнем конвекции, и ему соответствует верхняя граница конвективного облака [4].

Модель частицы не является идеальной, она не учитывает некоторых факторов, существующих объективно, поэтому результаты, полученные с ее помощью, отличаются от фактического состояния атмосферы. Данная работа призвана исследовать возможность использования модели частицы для восстановления вертикального профиля температуры в кучево-дождевой облачности.

Материалы и методы исследования

На начальном этапе работы в качестве альтернативного пути получения информации о распределении температуры в атмосфере с высотой рассматривались данные стандартной атмосферы и средние климатические показатели.

По двум независимым выборкам фактического материала, составленным за теплый период с мая по сентябрь для центра европейской части России, был проведен статистический анализ. Для изотермических уровней 0°C , -10°C и -20°C были получены значения их средних высот, а также максимальных отклонений от среднего значения.

Анализ результатов позволил сделать вывод о наименьшей изменчивости высоты расположения определенной температуры в июле, то есть в середине исследуемого периода, и увеличении изменчивости к переходным периодам года. Объясняется данный факт тем, что в середине лета господствующие воздушные массы наиболее однотипны, тогда как весной и осенью воздух может приходиться из различных широтных поясов. Кроме того, наименьшим постоянством обладает высота изотермы 0°C из-за близости данного уровня к земной поверхности и существенного влияния ее прогрева.

Также было оценено сходство рассчитанных средних значений высот расположения изотерм с данными стандартной атмосферы.

Результаты свидетельствуют о максимальном сходстве высот всех изотерм в мае и наименьшем в июле. Указанная картина сложилась вследствие осреднения данных для стандартной атмосферы за весь год, тогда как альтернативные сведения получены только для теплого периода.

В результате можно сделать вывод о том, что фактически наблюдаемые значения высот расположения изотермических уровней имеют значительный разброс относительно полученного среднего. Минимальное несоответствие прослеживается в середине лета. В то же время в середине теплого периода наблюдается наименьшая согласованность данных стандартной атмосферы и расчетных средних высот.

Таким образом, информация стандартной атмосферы существенно отличается от фактического хода температуры воздуха, особенно для июля, что исключает возможность ее использования для решения задачи мониторинга кучево-дождевой облачности.

В данной работе предлагается использовать адиабатическую модель развития

конвективного облака для оценки высоты расположения различных температурных уровней.

Алгоритм, описывающий модель конвекции, можно представить следующим образом [5].

Исходными данными являются атмосферное давление P_0 , температура воздуха T_0 , измеренные у земной поверхности, и высота нижней границы облаков $H_{\text{нго}}$, зарегистрированная также с поверхности земли.

Для работы модели необходима информация о температуре на уровне высоты нижней границы облачности, то есть на уровне конденсации ($H_{\text{нго}} = H_{\text{ук}}$). Определяется температура на данном уровне при помощи выражения

$$T_{\text{ук}} = T_0 - 0,98 \frac{H_{\text{ук}}}{100}, \quad (1)$$

где 0,98 – величина, на которую температура изменяется в воздухе при его подъеме на высоту 100 м до момента начала конденсации водяного пара (сухоадиабатический вертикальный температурный градиент).

Атмосферное давление, входящее в параметры модели, находится на уровне конденсации при помощи барометрической формулы вида

$$P_{\text{ук}} = P_0 \exp \left(- \frac{g H_{\text{ук}}}{R_c \left(\frac{T_0 - T_{\text{ук}}}{2} \right)} \right), \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения, R_c – удельная газовая постоянная сухого воздуха.

При помощи выражений (1) и (2) определены переменные величины, необходимые для дальнейшей реализации модели.

Вследствие того, что подъем воздуха выше уровня конденсации осуществляется с выделением скрытого тепла конденсации, температура его изменяется по влажноадиабатическому закону, не являющемуся линейным. Однако при незначительных изменениях высоты подъема облачного воздуха изменение его температуры можно описать при помощи влажноадиабатического градиента, считая его постоянным.

Следуя приведенному допущению, определим необходимые величины на уровне, находящемся выше уровня конденсации на 10 гПа. Высота может быть получена при помощи формулы Бабины:

$$H = H_{\text{ук}} + 16000 \frac{P_{\text{ук}} - (P_{\text{ук}} - 10)}{P_{\text{ук}} + (P_{\text{ук}} - 10)} (1 + 0,004 T_{\text{ук}}). \quad (3)$$

Температура рассчитывается при помощи формулы

$$T = T_{\text{ук}} - \frac{\gamma}{100} (H - H_{\text{ук}}), \quad (4)$$

где γ – величина влажноадиабатического градиента, определяемого выражением

$$\gamma = \frac{P_{\text{ук}} + 5420,93 \frac{E}{T_{\text{ук}} + 273,15}}{P_{\text{ук}} + 8397212,04 \frac{E}{(T_{\text{ук}} + 273,15)^2}}, \quad (5)$$

где E представляет собой упругость водяного пара, находящегося в состоянии насыщения, на предыдущем уровне, то есть уровне конденсации. Находится при помощи выражения

$$E = 6,1078 \exp \left(\frac{17,13 T_{\text{ук}}}{235 + T_{\text{ук}}} \right). \quad (6)$$

Зная температуру воздуха и высоту уровня в облаке, на котором давление ниже, чем на уровне конденсации на 10 гПа, можно при помощи выражений (3–6) аналогично рассчитать искомые величины (температуру воздуха и высоту его расположения) для всех вышележащих слоев облака до его верхней границы.

Отсутствие данных о высоте нижней границы облачности $H_{\text{нго}} = H_{\text{ук}}$ можно компенсировать информацией о температуре точки росы Td_0 , измеренной у поверхности земли. Зная P_0 , T_0 и Td_0 , можно определить значения T и Td на уровне высоты нижней границы облачности с помощью выражений

$$T = T_0 - k_t (P_0 - P_{\text{ук}}), \quad (7)$$

$$Td = Td_0 - k_q (P_0 - P_{\text{ук}}), \quad (8)$$

где k_t и k_q – значения средних угловых коэффициентов для сухих адиабат и изограмм.

Из выражений (7) и (8), учитывая то, что облачность начинает образовываться на высоте, где T становится равной Td , получаем выражение для нахождения давления на уровне конденсации

$$P_{\text{ук}} = P_0 + \frac{Td_0 - T_0}{k_t - k_q}. \quad (9)$$

Используя значение $P_{\text{ук}}$, при помощи формулы Бабины определяем высоту нижней границы облачности:

$$H_{\text{ук}} = H_{\text{нго}} = 16000 \frac{P_0 - P_{\text{ук}}}{P_0 + P_{\text{ук}}} (1 + 0,004 T_{\text{ук}}). \quad (10)$$

Далее, применяя полученные данные, с использованием приведенного ранее алгоритма определяется высота любого изотермического уровня в конвективном облаке.

**Результаты исследования
и их обсуждение**

Следующим этапом в работе было испытание предлагаемого способа оценки высоты расположения любого изотермического уровня в конвективной облачности. По двум независимым выборкам исходных данных объемом 100 и 33 случая, состоящим из значений P_0 , T_0 и $H_{\text{нго}}$, по приведенному выше алгоритму были рассчитаны высоты изотермических уровней 0°C , -10°C и -20°C . Контрольным материалом для сравнения служили фактические данные радиозондирования атмосферы.

Ряды полученных значений высот изотерм длиной 100 случаев обозначим выборкой 1, а длиной 33 случая – выборкой 2. На рис. 1 и 2 графически представлены резуль-

таты сравнения фактических и рассчитанных при помощи модели значений высоты изотермы с номиналом 0°C .

На графиках видно, что расчетные значения высоты изотермы меньше, чем фактические. Результаты, полученные для значений высот изотермических уровней -10°C и -20°C , аналогичны картине, представленной на рис. 1 и 2. Для количественной оценки данной разницы были рассчитаны величины отклонения расчетных значений высот изотерм от фактических. На рис. 3 и 4 представлены результаты для изотермического уровня -10°C .

Из рис. 3 и 4 видно, что результаты эксперимента практически по всему объему выборок 1 и 2 меньше фактических, причем иногда существенно.

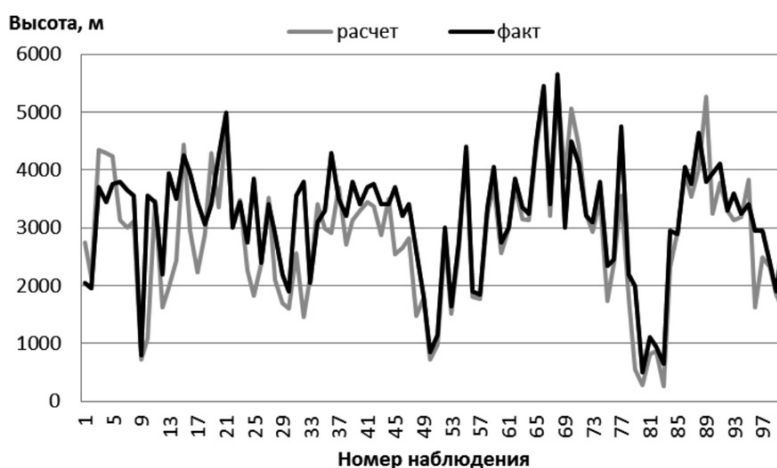


Рис. 1. Графики фактических и рассчитанных значений высоты нулевой изотермы по выборке 1

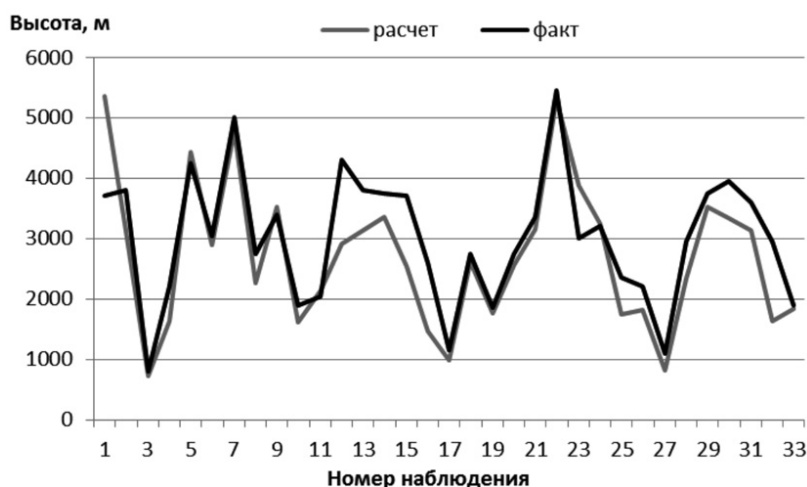


Рис. 2. Графики фактических и рассчитанных значений высоты нулевой изотермы по выборке 2

Статистические оценки качества предлагаемого способа

	δ , м		σ , м		$\hat{\delta}$, м		r	
	Выборка 1	Выборка 2	Выборка 1	Выборка 2	Выборка 1	Выборка 2	Выборка 1	Выборка 2
0°C	494	157	713	366	-321	-97	0,81	0,84
-10°C	620	223	879	522	-508	-178	0,79	0,78
-20°C	774	261	1075	600	-670	-229	0,74	0,77

Для количественной оценки качества восстановления высот изотерм в конвективной облачности, то есть для оценки адекватности предлагаемого способа, были рассчитаны следующие статистические характеристики, рекомендуемые в [6]: средняя абсолютная ошибка δ , средняя квадратическая ошибка σ , средняя арифметическая (систематическая) ошибка $\hat{\delta}$ и коэффициент корреляции между рассчитанными и фактическими значениями высот одной и той же изотермы r . Значения статистических характеристик представлены в таблице.

Как видно из таблицы, все рассчитанные для выборки 2 параметры лучше, чем для выборки 1, а также они ухудшаются от изотермы 0°C к изотерме -20°C. Первая закономерность связана, по всей видимости, с тем, что при увеличении объема выборки материала для испытаний увеличивается количество случаев с ошибками, приводящими к росту погрешностей. Вторая закономерность – с ухудшением качества определения высоты изотерм на больших высотах в конвективном облаке, что обусловлено несовершенством используемой модели.

Заключение

Таким образом, в данной работе предложен способ оценки высоты нахождения изотермических уровней в мощной конвективной облачности, основанный на использовании модели конвекции. Эксперимент, проведенный по итогам работы над способом, позволил рассчитать некоторые показатели успешности, которые дают возможность оценить адекватность, точность и устойчивость результатов предлагаемого подхода. Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности данного способа, призванного без проведения контактных измерений оценить распределение температуры с высотой в мощной конвективной облачности. Однако из-за отдельных значительных ошибок и роста погрешности при увеличении высоты расположения исследуемого уровня в облаке следует рассматривать предлагаемый способ в каче-

стве консультативного и искать пути его совершенствования. Одно из направлений дальнейшей работы видится в применении других, более сложных моделей развития конвективного облака и разработке программных продуктов по реализации моделей конвекции [7].

Список литературы / References

1. Сольникова В.Е. Краткий курс авиационной метеорологии: учебное пособие. М.: Авиабизнес, 2010. 124 с.
2. Solynina V.E. A short course in aviation meteorology: a training manual. M.: Aviabiznes, 2010. 124 p. (in Russian).
3. Червяков М.Ю. Зондирование атмосферы: учебно-методическое пособие для студентов, обучающихся по направлению 05.03.05 Прикладная гидрометеорология. Саратов: ИЦ «Наука», 2019. 62 с.
4. Chervyakov M.Yu. Atmospheric sounding: educational and methodical manual for students studying in the direction of 05.03.05 Applied hydrometeorology. Saratov: ICz «Nauka», 2019. 62 p. (in Russian).
5. Бухаров М.В., Алексеева А.А., Глушкова Н.И. Способ определения высоты нулевой изотермы в облаках // Патент РФ № 2193787. Патентообладатель Бухаров М.В. 2002. Бул. № 33.
6. Buharov M.V., Alekseeva A.A., Glushkova N.I. Method for determining the height of the zero isotherm in clouds // Patent RU № 2193787. Patentee Buharov M.V. 2002. Bull. № 33 (in Russian).
7. Губенко И.М. Исследование физических процессов в конвективных облаках во время гроз на основе численного моделирования: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва, 2016. 130 с.
8. Gubenko I.M. Investigation of physical processes in convective clouds during thunderstorms on the basis of numerical simulation: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Moskva, 2016. 130 p. (in Russian).
9. Неижмак А.Н., Расторгуев И.П. Методика оценки высоты развития кучево-дождевой облачности // Гелиогеофизические исследования. 2014. № 9. С. 125–129.
10. Neizhmak A.N., Rastorguev I.P. Method of evaluation the height of the development of cumulonimbus clouds // Geliogeofizicheskie issledovaniya. 2014. № 9. P. 125–129 (in Russian).
11. РД 52.27.284–91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. СПб.: Гидрометеоиздат, 1991. 150 с.
12. Петросян Я.В., Расторгуев И.П., Неижмак А.Н. Программа расчета высоты верхней границы конвективной облачности. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010610011. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.01.2010.
13. Petrosyan Ya.V., Rastorguev I.P., Neizhmak A.N. Program for calculating the height of the upper boundary of convective clouds. Certificate of state registration of computer programs. № 2010610011. Registered in the Register of computer programs 11.01.2010 (in Russian).