

УДК 551.501.776

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЫСОТЫ РАЗВИТИЯ КУЧЕВО-ДОЖДЕВОЙ ОБЛАЧНОСТИ

А. Н. Неижмак, И. П. Расторгуев

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

Предложена методика оценивания высоты верхней границы кучево-дождевой облачности, базирующаяся на адиабатической модели развития облака, с использованием данных инфракрасного зондирования с борта космического аппарата и приземных метеорологических наблюдений.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ОБЛАЧНОСТЬ, ЗОНДИРОВАНИЕ, ВЫСОТА ОБЛАЧНОСТИ.

Гидрометеорологическое обеспечение авиационных подразделений требует от инженера-синоптика решения множества специальных задач, к числу которых относится постоянное наблюдение за полем облачности в целях диагноза типа облаков и высот расположения облачных слоев, а также прогноза их перемещения и развития.

Наиболее опасные для полетов условия связаны с кучево-дождевой облачностью. Подтверждает данный факт, например, ситуация над Донецким кряжем 22 августа 2006 года, когда пассажирское воздушное судно потерпело катастрофу при встрече с экстремальными летно-метеорологическими условиями, связанными с кучево-дождевой облачностью. Интенсивность ее развития была недооценена и потому выбрана ошибочная тактика преодоления грозового фронта [1].

Качественно оценить интенсивность развития конвективной облачности можно по величине ее вертикальной мощности, то есть по разнице высот нижней и верхней границ. Для определения высоты нижней границы облачности существует несколько достаточно удобных способов. Высота верхней границы (ВВГ) кучево-дождевой облачности в практике метеорологического обеспечения авиации определяется гораздо сложнее, о чем будет сказано далее. Поэтому целью работы является повышение качества метеорологического обеспечения авиации путем разработки методики оценки ВВГ кучево-дождевой облачности, базирующейся на фактических данных космического зондирования и приземных метеорологических наблюдений. Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ существующих методик определения ВВГ конвективной облачности, выявить их положительные и отрицательные стороны;
- разработать методику оценки высоты развития кучево-дождевой облачности, основанную на классической адиабатической модели развития облака и использующую данные приземных метеорологических наблюдений совместно с результатами измерений космическим аппаратом температуры на верхней границе облачности;
- осуществить оценку адекватности разработанной методики.

ВВГ кучево-дождевой облачности определяется, как правило, при помощи двух подходов: в ходе радиолокационной или воздушной разведки погоды.

Сущность радиолокационной разведки заключается в активном зондировании атмосферы, в результате которого по параметрам «радиоэха» оценивают некоторые характеристики облачности, в том числе и ВВГ. К недостаткам данного подхода можно отнести редкую сеть радиолокационных станций и существенную зависимость качества зондирования от состояния атмосферы между станцией и целью.

Воздушная разведка погоды представляет собой полет пилотируемого летательного аппарата с целью оценки некоторых параметров состояния атмосферы. Очевидно, что это дорогостоящая, нерегулярная процедура, поэтому данные воздушной разведки погоды, являясь наиболее объективными, могут получаться и применяться при решении достаточно ограниченного числа задач метеорологического обеспечения. Кроме того, далеко не все метеорологические подразделения имеют возможность выполнить радиолокационную разведку вследствие отсутствия станции и воздушную (в целях опре-

деления ВВГ кучево-дождевой облачности) – из-за эксплуатационных особенностей базирующихся на аэродроме летательных аппаратов.

Кроме рассмотренных выше существует также методика оценки ВВГ кучево-дождевой облачности по информации, получаемой от метеорологических космических аппаратов [2]. Современные технологии космического зондирования позволяют дистанционно получать информацию о многих характеристиках атмосферы, в том числе и о радиационной температуре излучающей поверхности [3]. При нахождении облачности в поле зрения радиометра инфракрасное излучение, формируемое облаками, регистрируется аппаратурой в реальном масштабе времени, то есть оценивается температура верхней границы облачности. Данный факт позволяет рассмотреть возможность использования полученной радиационной температуры в задаче оценки ВВГ кучево-дождевой облачности.

Методика, описанная в [2], основывается не только на данных прямых спутниковых измерений, но и на учете специально рассчитываемых прогностических данных о температуре воздуха в атмосфере. Следовательно, успешность оценки ВВГ кучево-дождевой облачности зависит не только от точности спутниковых измерений, но и используемой прогностической информации, что влечет за собой дополнительные погрешности.

Таким образом, существующие методики могут быть реализованы метеоподразделениями далеко не во всех ситуациях, требующих знания ВВГ кучево-дождевой облачности, что влечет за собой ухудшение качества метеорологического обеспечения.

Предлагаемая методика определения ВВГ кучево-дождевой облачности основана на классической адиабатической модели развития облака [4] с использованием спутниковых измерений радиационной температуры верхней границы кучево-дождевой облачности.

Методика может реализовываться двумя путями в зависимости от наличия исходных данных о высоте нижней границы облачности [5, 6]. В качестве исходных данных используются: приземные атмосферное давление  $P_0$ , температура воздуха  $T_0$  и температура точки росы  $Td_0$  (или высота нижней границы облачности  $H_{нго}$ ), а также измеренная космическим аппаратом температура верхней границы облачности  $T_{гго}$ .

При отсутствии данных о  $H_{нго}$  необходимо определить высоту уровня конденсации, то есть нижней границы облачности, и температуру на этом уровне.

Ввиду того, что температура воздуха в ненасыщенной водяным паром атмосфере изменяется по линейному сухоадиабатическому закону, температура и температура точки росы на уровне конденсации определяются с помощью следующих выражений:

$$T_{ук} = T_0 - k_T (P_0 - P_{ук}), \quad (1)$$

$$Td_{ук} = Td_0 - k_q (P_0 - P_{ук}), \quad (2)$$

где  $P_{ук}$  – атмосферное давление на уровне конденсации,  $k_T$  и  $k_q$  – средние угловые коэффициенты сухих адиабат и изограмм [7].

С учетом того, что на уровне конденсации температура воздуха становится равной температуре точки росы (происходит конденсация водяного пара), выражение для нахождения давления на уровне конденсации имеет вид:

$$P_{ук} = P_0 + \frac{Td_0 - T_0}{k_T - k_q}. \quad (3)$$

С использованием формулы Бабинье определяется высота уровня конденсации, соответствующего нижней границе облачности:

$$H_{ук} = H_{нго} = 16000 \cdot \frac{P_0 - P_{ук}}{P_0 + P_{ук}} \cdot (1 + 0,004 T_{ук}), \quad (4)$$

где  $T_{ук}$  – температура на уровне конденсации, определяемая с помощью выражения (1).

Таким образом определены метеорологические величины на уровне конденсации, требующиеся для дальнейших расчетов.

Температура облачного воздуха выше уровня конденсации изменяется с высотой по нелинейному влажноадиабатическому закону, зависящему от температуры. С целью учета данного факта восста-

новление вертикального профиля температуры в облаке осуществляется в работе от уровня конденсации с малым приращением по высоте (10 гПа). Высота уровня, расположенного выше  $H_{нзо}$  на 10 гПа, рассчитывается с помощью выражения:

$$H = H_{ук} + 16000 \cdot \frac{P_{ук} - (P_{ук} - 10)}{P_{ук} + (P_{ук} - 10)} \cdot (1 + 0,004 \cdot T_{ук}). \quad (5)$$

Чтобы определить температуру на данном уровне используется выражение (6). Предварительно необходимо рассчитать значение вертикального влажноадиабатического температурного градиента  $\gamma$  в слое, используя выражение (7).

$$T = T_{ук} - \frac{\gamma}{100} \cdot (H - H_{ук}), \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{P_{ук} + 5420,93 \cdot \frac{E}{T_{ук} + 273,15}}{P_{ук} + 8397212,04 \cdot \frac{E}{(T_{ук} + 273,15)^2}}, \quad (7)$$

где  $E$  – максимальная упругость водяного пара на уровне конденсации, которая находится при помощи эмпирического выражения (8):

$$E = 6,1078 \cdot \exp\left(\frac{17,13 \cdot T_{ук}}{235 + T_{ук}}\right). \quad (8)$$

Далее рассчитываются высота и температура последующих вышележащих уровней облачного воздуха.

Вычисления продолжаются до тех пор, пока температура облачного воздуха на следующем расчетном уровне станет ниже или будет равняться температуре на верхней границе кучево-дождевых облаков, полученной по результатам спутникового зондирования. После выполнения этого условия значение  $H_{зо}$  находится методом интерполяции.

При наличии данных о  $H_{ук}=H_{нзо}$  температура на уровне конденсации находится из выражения (9):

$$T_{ук} = T_0 - 0,98 \cdot \frac{H_{ук}}{100}, \quad (9)$$

где 0,98 °C/100 м – значение вертикального градиента температуры воздуха при подъеме его по сухоадиабатическому закону.

По барометрической формуле вида (10) определяется давление на уровне конденсации [7]:

$$P_{ук} = P_0 \exp\left(-\frac{g \cdot H_{ук}}{R_c \cdot \left(\frac{T_0 - T_{ук}}{2}\right)}\right), \quad (10)$$

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

Температура и высота облачного воздуха выше уровня конденсации определяются аналогично описанному выше подходу.

На рисунке представлен пример вычислений ВВГ конвективной облачности по разработанной методике:

Рабочее окно программы.

В ходе вычислений программа [8] помимо значений давления на уровне конденсации и на уровне верхней границы облачности, высоты уровня конденсации, температуры на уровне конденсации и непосредственно ВВГ облачности представляет значения высоты изобарических поверхностей, температуры воздуха на них, а также вертикального температурного градиента на всех расчетных уровнях.

Во вкладке «Графика» представляется кривая состояния адиабатического подъема единичного объема воздуха.

На данном этапе работы были проведены оценочные испытания разработанной методики определения ВВГ кучево-дождевой облачности. Сравнительный анализ результатов реализации полученной методики и данных метеорологических радиолокаторов (МРЛ), принятых за эталон, был проведен по архивным материалам летних периодов 2006–2007 годов. В качестве исходной информации использовались материалы спутниковой съемки с метеорологических космических аппаратов группировки NOAA, кольцевые карты погоды и карты данных МРЛ по европейской территории России. Была набрана архивная выборка объемом 38 случаев. Испытания показали, что расхождение результатов применения авторской методики и данных МРЛ в большинстве случаев составляют не более 1 км. Различия более 1 км наблюдались при регистрации кучево-дождевой облачности на дальности более 150 км от МРЛ, что связано с увеличением погрешности измерений МРЛ.

Большей согласованности результатов можно, по-видимому, добиться сокращением разницы во времени между приземными метеорологическими наблюдениями и спутниковым зондированием. В то же время результаты испытаний полученной методики свидетельствуют о возможности применения (в рамках существующих градаций) предлагаемой методики в районах, не охваченных радиолокационным наблюдением.

Таким образом, внедрение в оперативную практику метеорологического обеспечения авиации разработанной методики позволит оценивать высоту верхней границы кучево-дождевой облачности, что, в свою очередь, обеспечивает повышение качества метеорологического обеспечения. При использовании данной методики достаточно данных стандартных приземных метеорологических наблюдений и спутниковых измерений радиационной температуры на верхней границе кучево-дождевой облачности, не требуется привлечения радиолокационных средств и средств воздушной разведки погоды, а кроме того временные и финансовые затраты минимальны.

**METHOD OF EVALUATION THE HEIGHT OF THE DEVELOPMENT OF CUMULONIMBUS CLOUDS**

A.N. Neizhmak, I.P. Rastorguev

Suggest a methodology of estimating the height of the top border of cumulonimbus clouds, based on the adiabatic model of development of the cloud, using data from the infrared sounding from the spacecraft and ground meteorological observations.

**KEYWORDS:** HEIGHT OF THE TOP BORDER OF CUMULONIMBUS CLOUDS, ADIABATIC MODEL OF DEVELOPMENT OF THE CLOUD, INFRARED SOUNDING, GROUND METEOROLOGICAL OBSERVATIONS.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Песков Б.Е., Алексеева А.А., Черный С.Э. Экстремальные для авиации метеорологические условия над Донецким кряжем 22 августа 2006 г. // Метеорология и гидрология, 2007. №5. С. 37–45.
2. Бухаров М.В., Говоров Д.В. Анализ соответствия между результатами автоматизированной метеорологической дешифровки информации с геостационарного спутника и данными МРЛ: (сайт). URL: [http://d33.infospace.ru/d33\\_conf/2008\\_pdf/1/58.pdf](http://d33.infospace.ru/d33_conf/2008_pdf/1/58.pdf) (дата обращения: 05.11.2010).
3. Алексеева А.А., Бухаров М.В., Лосев В.М., Соловьев В.И. Диагноз осадков и гроз по измерениям уходящего теплового излучения облачности с геостационарных спутников // Метеорология и гидрология, 2006. № 8. С. 33–42.
4. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы: Учебник. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 776 с.
5. Неижмак А.Н., Расторгуев И.П., Петросян Я.В., Марчуков С.В. Способ определения высоты верхней границы кучево-дождевой облачности. Патент РФ № 2482521, G 01 W 1/00, от 20 мая 2013 г.
6. Неижмак А.Н., Расторгуев И.П., Виноградов Н.П. Способ определения высоты верхней границы мощной конвективной облачности. Патент РФ № 2491582, G 01 W 1/00, от 27 августа 2013 г.
7. Сборник алгоритмов и программ расчетных метеорологических задач для решения на ПЭВМ. М.: Воениздат, 1992. 304 с.
8. Неижмак А.Н., Петросян Я.В., Расторгуев И.П. Программа расчета высоты верхней границы конвективной облачности. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2010610011 от 11.01.2010.