
ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МЕТЕООБСТАНОВКИ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ БОРТОВОГО ПО

Д.В. Метлицкая, Г.Ю. Христофоров (Москва)

Введение

В настоящее время одной из важнейших проблем в организации воздушного движения является все возрастающая интенсивность, которая сочетается с задачами повышения безопасности, экономической эффективности и регулярности полетов. Одним из путей решения данной проблемы является разработка новых бортовых функций, способствующих повышению пропускной способности воздушного пространства, безопасности полетов, снижению расходов топлива и экономических затрат.

Одним из инструментов проведения исследований новых бортовых функций является стенд «КИС УВД» – «Комплексный исследовательский стенд управления воздушным движением», предназначенный: для отработки и исследования функционального взаимодействия бортовой и наземной компоненты при решении задач наблюдения и самолетовождения в сложных условиях; отработки перспективных функциональных возможностей борта; оценки эффективности применения новых бортовых средств.

При проведении имитационного моделирования и исследований, связанных с отработкой бортовых функций и управлением воздушным движением, важную роль играют данные об окружающей метеобстановке. Они необходимы для обеспечения безопасности полетов и ситуационной осведомленности пилота и диспетчера, а также должны учитываться во всех бортовых и наземных приложениях.

В рамках стенда «КИС УВД» данные о метеобстановке необходимы для проведения исследований по ряду бортовых процедур. Для имитации окружающей метеобстановки в состав стенда включена динамическая модель метеоявлений.

Модель метеоявлений в составе стенда «КИС УВД»

Динамическая модель опасных метеоявлений разработана в рамках полунатурного исследовательского стенда «КИС УВД» и предназначена для имитации метеорологической обстановки в некоторой заданной части воздушного пространства. Модель имитирует развивающиеся во времени и пространстве опасные метеорологические условия (кучево-дождевые облака) и обеспечивает необходимой информацией другие модели стенда. Схема взаимодействия модели опасных метеоявлений с другими моделями стенда представлена на рис. 1.

Перед началом работы в модель поступает информация о сценарии развития метеоявлений, который необходимо моделировать, информация о ветрах и области воздушного пространства, в которой будет проводиться моделирование. Затем, во время своей работы, модель метеоявлений имитирует развитие грозовых облаков с учетом ветра (см. математическую модель облака) и периодически формирует данные о размере и местоположении опасных метеоявлений, которые отправляются в модель 3D визуализации для отображения облаков на карте и в модель наземной системы наблюдения для последующей их обработки.

В модели наземной системы наблюдения имитируется работа наземного метеолокатора. Данные о метеобстановке преобразуются в карты облачности – изображения срезов облаков на наборе заданных высот, привязанные к географическим координатам – которые затем поступают на индикатор систем УВД и через имитационную автоматическую систему УВД в модель воздушного судна и модель внешней воздушной обстановки. Также при формировании карт облачности моделируются ошибки измерений метеолокатора.

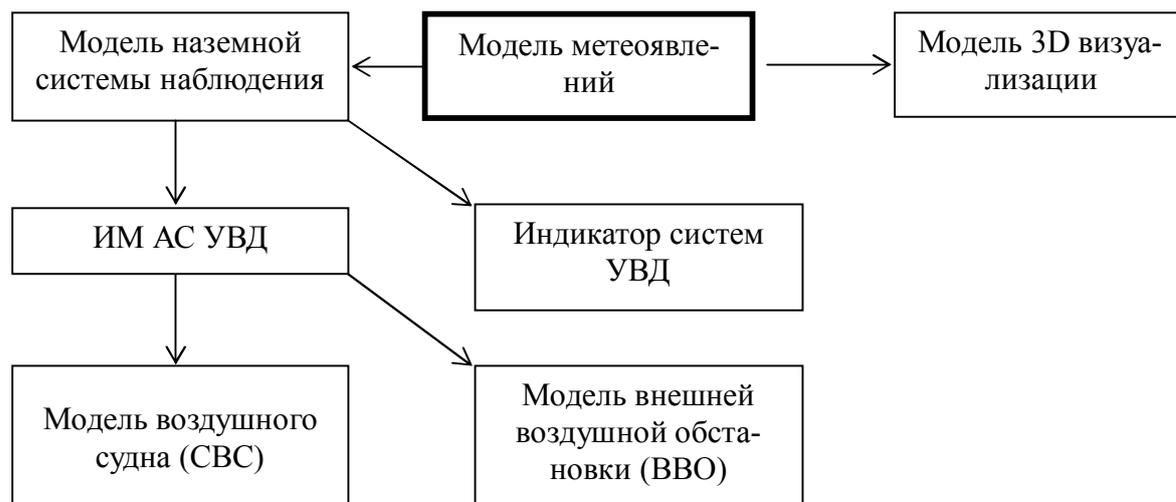


Рис. 1. Схема взаимодействия модели опасных метеоявлений с моделями стенда «КИС УВД»

Физическая модель облака

Согласно принятой всемирной метеорологической организацией классификации, выделяют три типа кучево-дождевых облаков: одноячейковые, многоячейковые и облака типа сверхячеек.

Одноячейковые кучево-дождевые облака состоят из одной конвективной ячейки и имеют осесимметричную форму. Верхняя граница одноячейковых облаков достигает уровня 8–12 км, поперечный размер 5–20 км, продолжительность жизни около 1 ч, высота основания 0,4–2 км. Цикл жизни одноячейкового облака представлен на рис. 2.

Многоячейковые облака состоят из нескольких конвективных ячеек, находящихся на разных стадиях развития. Они имеют поперечные размеры 20–40 км, их вершины могут подниматься до стратосферы (до 16 км). В многоячейковых облаках в северном полушарии новые ячейки образуются спереди и на правом фланге относительно направления перемещения облака. Осадки начинают выпадать в задней части облака. Продолжительность жизни таких облаков в среднем около 1,5 ч.

Очаги по типу сверхячейки имеют одноячейковую структуру круговой или эллиптической формы с горизонтальными размерами 20–40 км и высотой 12–16 км. Сверхячейковые облака встречаются редко, однако с ними связаны наиболее опасные явления. Продолжительность жизни сверхячеек достигает 4 ч.

Все грозовые облака, независимо от их типа, последовательно проходят стадии развития кучевого облака, стадию зрелого грозового облака и стадию распада.

Математическая модель облака

На основе теоретических данных создана математическая модель трех типов грозовых облаков: одноячейкового, многоячейкового и сверхячейки.

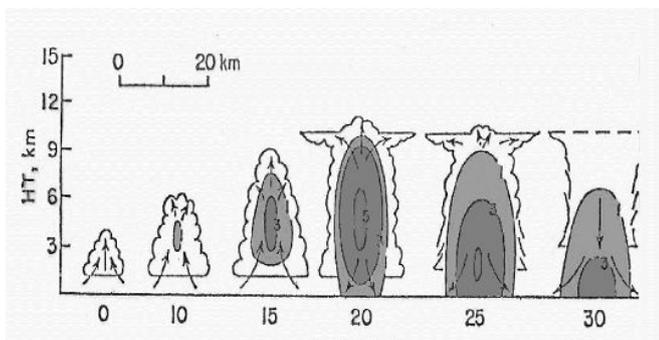


Рис. 2. Цикл жизни одноячейкового облака

Одноячейковое грозное облако. Время жизни одноячейкового грозного облака $t_{ж}$ варьируется от 30 до 60 минут. Весь жизненный цикл облака делится на три основных стадии.

Стадия развития $0 \leq t < t_{ж}/3$. Растут высота и радиус облака, достигая своего максимума. Увеличивается плотность внутри облака.

Стадия зрелости $t_{ж}/3 \leq t < 5t_{ж}/6$. Высота и радиус облака неизменны, интенсивность внутри облака растет и достигает своего максимума к моменту $t = 2t_{ж}/3$.

Стадия распада $5t_{ж}/6 \leq t \leq t_{ж}$. Идет интенсивное выпадение осадков и рассеивание облака.

Упрощенную пространственную модель одноячейкового грозного облака можно представить в виде перевернутого усеченного эллиптического параболоида (рис. 3). На рис. 4 изображен срез облака на заданной высоте h . Модель имитирует облако, содержащее части с небольшой (R , зеленая область), средней ($R1$, желтая область) и высокой ($R2$, красная область) интенсивностью осадков. Центральной части облака соответствует уровень опасности 3, средней – 2, крайней – 1, а окружающему пространству – 0.

Движение центра модели облака задается соотношениями:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{V_{\varphi}(\varphi, \lambda, t, h)}{R_3 + h}, \quad \frac{d\lambda}{dt} = \frac{V_{\lambda}(\varphi, \lambda, t, h)}{(R_3 + h) \cos \varphi}, \quad (1)$$

где φ – широта, λ – долгота центра облака, $V_{\varphi}(\varphi, \lambda, t, h)$ и $V_{\lambda}(\varphi, \lambda, t, h)$ скорость ветра (м/с) в меридиональном и широтном направлениях на заданной высоте h .

Высота облака $H(t)$ определяется соотношениями:

$$H(t) = \begin{cases} 3 \cdot H_{\max} \cdot t/t_{ж}; & 0 \leq t < t_{ж}/3 \\ H_{\max}; & t_{ж}/3 \leq t < 5 \cdot t_{ж}/6 \\ 6 \cdot H_{\max} \cdot (1 - t/t_{ж}); & 5 \cdot t_{ж}/6 \leq t \leq t_{ж}. \end{cases} \quad (2)$$

Абсолютная высота нижней кромки облака задается величиной h_{\min} , абсолютная высота верхней кромки облака вычисляется по формуле $h_{\max} = h_{\min} + H(t)$, $t_{ж}$ – время жизни облака, H_{\max} – максимальная высота облака.

Радиус горизонтального среза $R(h, t)$ определяется следующими соотношениями:

$$R(h, t) = \begin{cases} 0, & h < h_{\min} \text{ и } h > h_{\min} + H(t); \\ \sqrt{\frac{(h_{\min} + H(t) - h) \cdot R_{\max}^2}{H_{\max}}}, & h_{\min} \leq h \leq h_{\min} + H(t), \end{cases} \quad (3)$$

где h – заданная высота, для которой формируется срез метеоинформации, R_{\max} – максимальный радиус облака.

Процесс развития внутренних областей с большей интенсивностью определяется соотношениями (1 – 3) аналогичным образом.

Многаячейковое грозное облако. Время жизни многаячейкового грозного облака $t_{ж_обл}$ варьируется от 1 до 2 часов. Многаячейковое грозное облако моделируется как суперпозиция нескольких одноячейковых облаков.

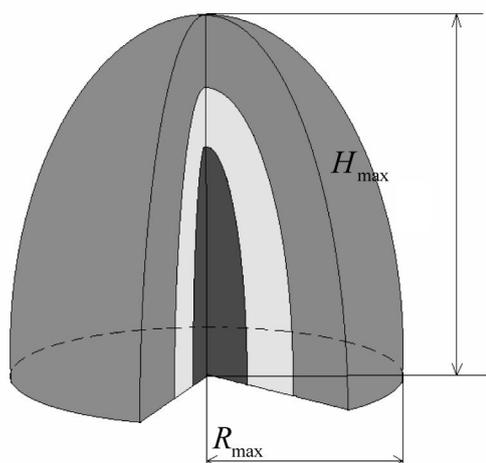


Рис. 3. Пространственная модель одноячейкового грозового облака

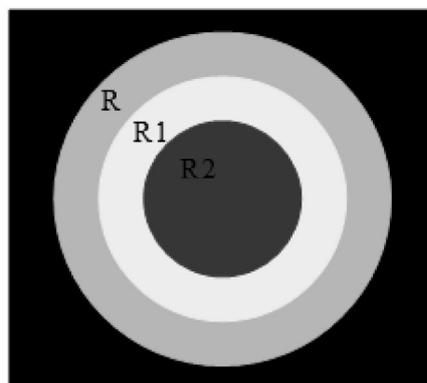


Рис. 4. Срез одноячейкового грозового облака на высоте h

Процесс моделирования начинается с задания количества ячеек в облаке и создания первой ячейки. Затем через некоторые равные промежутки времени создаются последующие ячейки по правилам:

- следующая ячейка создается на границе предыдущей (последней созданной) ячейки;

- следующая ячейка создается либо в случайном, либо в фиксированном направлении относительно предыдущей. Направление создания следующей ячейки составляет с направлением скорости ветра угол α , который задается случайным образом из промежутка $[-90^\circ; 45^\circ]$, согласно равномерному закону распределения, либо фиксируется соответственно.

Сверхячейка. Облако типа сверхячейка предлагается моделировать как одноячейковое грозовое облако с характерными для сверхячейки размерами и временем жизни.

Применение модели метеоявлений при исследовании бортового ПО

Как отмечалось ранее, в модель воздушного судна поступает информация об окружающей метеобстановке в виде карт облачности. В составе данной модели разработан модуль обработки метеоинформации, который по полученной карте облачности строит полигоны, огибающие опасные метеоявления. Вершины полученных полигонов представляют собой точки с координатами (широтой и долготой), удобные для обработки бортовым ПО.

На стенде «КИС УВД» проводятся исследования бортовых функций, связанных с избеганием попадания в области опасных метеоявлений. Одной из бортовых процедур, исследуемых на стенде «КИС УВД», является процедура ремаршрутизации. При обнаружении пересечений текущего плана полета с опасными метеоявлениями бортовое ПО строит новый маршрут, учитывая при этом расположение всех опасных метеоявлений в окружающем воздушном пространстве. Другая бортовая процедура – функция предупреждения опасных сближений с областями ограничения использования воздушного пространства. Это бортовое ПО дает рекомендации по оптимальному облету облаков с учетом недопущения опасных сближений с другими воздушными судами.

Особенностью разработанной модели является возможность имитации развития опасных метеоявлений во времени. Моделируемые облака растут, рассеиваются и сносятся

ся ветром, что позволяет использовать при исследовании «живую» картинку, приближенную к реальности. Имитационная модель метеоявлений позволяет учитывать особенности развития облаков, что особенно важно, когда требования к безопасности повышены, а информация о местонахождении и границах опасных метеоявлений играет основную роль при работе бортовых процедур. Например, рост облаков и их снос ветром определяют моменты времени, когда инициируется работа процедуры ремаршрутизации и играют определяющую роль при облете областей ограничения использования воздушного пространства.

Кроме того, для исследования работы бортового ПО при выполнении различных процедур важную роль играет набор сценариев для отработки процедуры, его полнота и разнообразие, позволяющие увидеть и анализировать работу процедуры в различных ситуациях. При использовании разработанной модели метеоявлений возможно моделирование сценариев развития опасных метеоявлений с различной конфигурацией их расположения, размера, интенсивности, времени возникновения и жизни. При использовании данной модели возможна корректировка сценариев и варьирование отдельными его параметрами. Таким образом, возможно исследование бортовых процедур в разнообразных метеорологических условиях.

Выводы

В докладе представлена динамическая модель опасных метеоявлений, созданная в рамках исследовательского стенда «КИС УВД» для имитации окружающей метеоситуации и обеспечения метеорологической информацией моделей стенда. Разработанная модель играет важную роль в исследовании бортовых приложений, моделируя различные сценарии для их отработки. В докладе также описаны физическая и математическая модели облака, по которым происходит моделирование развития метеоявлений.

Литература

1. **Метлицкая Д. В., Христофоров Г. Ю.** Разработка динамической модели опасных метеоявлений для полунатурного комплекса «КИС УВД» // Интеллектуальные системы. Труды 10-го межд. симпозиума. – М.: РУСАКИ, 2012. – С. 201–205.
2. **Метлицкая Д. В., Канадин В. Н.** Макет бортового программного средства обработки метеоизображений // 11-я Межд. конф. «Авиация и космонавтика – 2012», Москва, 2012. Тез. докл. – СПб: Мастерская печати, 2012. – С. 268–269.
3. **Ермакова А. И.** Особенности метеорологического обеспечения полетов на международных воздушных линиях. – М.: «Зенит», 1993.
4. **Васильев А. А., Шметер С. М.** Влияние кучево-дождевых облаков на условия полетов. – М.: Гидрометеиздат, 1984.
5. <http://www.igras.ru/index.php?r=207&id=7241>, сайт института географии РАН.