

Моделирование атмосферной конвекции с использованием данных дистанционного зондирования

И.П. Расторгуев¹, Д.А. Сурков²

¹Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Старых Большевиков 54А, Воронеж, Россия, 394064

²Воинская часть 34244, Ерошевского 94, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Предложено в классических моделях атмосферной конвекции использовать оперативные данные с дистанционно пилотируемых летательных аппаратов и специализированных космических аппаратов. По результатам численного эксперимента показана целесообразность данного подхода.

1. Введение

В докладе о глобальных рисках «Global Risks Report 2017» [1] на Всемирном экономическом форуме в Давосе в январе 2017 года список глобальных рисков возглавили экстремальные погодные явления.

На территории Российской Федерации за 2016 год [2] наблюдалось 988 опасных гидрометеорологических явлений (рекордное количество за время наблюдений). Из них 380 нанесли значительный ущерб отраслям экономики и жизнедеятельности населения. Основную часть из общего перечня аномальных проявлений погоды (590 случаев) составляют метеорологические опасные явления (ОЯ) и комплексы неблагоприятных метеорологических явлений (КМЯ). В теплое время года (с мая по сентябрь) наблюдалось большее число таких случаев – 62%. Более чем три четверти опасных метеорологических явлений в 2016 году на территории страны были вызваны активным развитием атмосферной конвекции. Отмечается также, что за последние 20 лет ежегодно остаются не предусмотренные прогнозами от 17 до 60 ОЯ. Указанный факт свидетельствует об актуальности дальнейшего совершенствования подходов к прогнозированию опасных явлений и, прежде всего, конвективного происхождения.

2. Описание эксперимента

Атмосферная конвекция является основной причиной формирования опасных явлений погоды в теплый период года. Нередки опасные конвективные явления также в переходные сезоны и зимой. Зависимыми от этих явлений являются практически все отрасли экономики, а также сфера обеспечения безопасности и обороноспособности государства.

Гидродинамическое, физико-статистическое и синоптическое прогнозирование опасных конвективных явлений в атмосфере базируется на расчете параметров конвекции, в основе которых лежат физические модели конвекции.

Наиболее простой и распространенной моделью атмосферной конвекции является «модель частицы». Данная модель основана на предположении, что частицы воздуха (в том числе и водяного пара) поднимаются от поверхности Земли под воздействием сил плавучести,

возникающих, прежде всего, за счет неоднородного прогрева участков подстилающей поверхности и, как следствие, прилегающих к ним порций воздуха. Всплытие влагосодержащих порций воздуха с приземного слоя возможно в случае превышения силами плавучести сил земного притяжения. Определяющим фактором величины силы плавучести является соотношение температур поднимающейся частицы (порции) воздуха и окружающего воздуха.

Температура окружающего воздуха на разных высотах определяется по данным радиозондирования атмосферы, проводимом два раза в сутки на специализированной сети аэрологических станций. Изменение температуры поднимающегося воздуха определяется до уровня конденсации (с которым отождествляется нижняя граница облака) по сухоадиабатическому закону, выше данного уровня – по влажноадиабатическому закону.

По данным радиозондирования также определяются характеристики влажности окружающего воздуха.

Для расчета температуры в ненасыщенном воздухе используется выражение

$$T_p = (T_0 + 273,15) \cdot (P/P_0)^{0,286} - 273,15,$$

где P_0 , P – давление у поверхности земли и на определенной высоте, T_0 , T_p – значения температуры поднимающегося воздуха у поверхности земли и на высоте с давлением P .

Для насыщенного воздуха применимо аналогичное выражение

$$T_p = (T_0 + 273,15) \cdot (P/P_0)^{0,286\beta} - 273,15,$$

в котором β равно

$$\beta = P_0 + 0,622 \cdot [(L \cdot E)/(R_c \cdot T_0)] \cdot [P_0 + 0,622 \cdot (L \cdot E)/(C_p \cdot R_{вп} \cdot T_0^2)]^{-1},$$

где R_c , $R_{вп}$ – удельные газовые постоянные сухого воздуха и водяного пара, C_p – удельная теплоёмкость воздуха, E – упругость насыщения, L – скрытая теплота испарения.

До изобарического уровня 500 гПа при автоматизированных расчетах с достаточной для практических целей точностью целесообразно использовать следующую аппроксимацию:

$$T_p = -1052,25 + 0,6041 \cdot (T_0 + 273,15)^{1,25} + 1045,0 \cdot (P/P_0)^{0,3} - 0,4004 \cdot (T_0 + 273,15)^{1,25} \cdot (P/P_0)^{0,3} - 219,0 \cdot (P/P_0)^{0,6}$$

Наличие данных о температуре воздуха поднимающейся частицы и окружающего воздуха, а также данных о профиле влажности, позволяет рассчитать практически любые предикторы для прогноза развития конвективной облачности и явлений погоды конвективного происхождения.

Для удобства и наглядности расчет прогностических параметров производится с использованием аэрологической диаграммы – на бланках или в электронном виде.

Необходимо отметить, что для производства расчетов используются прогностические распределения температуры и влажности. При этом в оперативной практике наиболее часто для построения прогностических профилей исходных величин используются метод Н.И. Бельского расчета максимального значения температуры у поверхности земли и метод «равновеликих площадей» – для прогноза значения температуры точки росы на момент максимального прогрева (максимального развития конвекции) [3].

Обратная сторона простоты модели частицы – меньшая сходимость с фактическими параметрами конвекции по сравнению с более сложными моделями. Так, завышение уровня конвекции (а значит и верхней границы, и вертикальной мощности конвективного облака) в среднем составляет 1-1,5 км. Погрешности в определении исходных данных в определенной степени искажают производные параметры, что приводит к снижению оправдываемости прогнозов, экономическим потерям и снижению уровня безопасности жизнедеятельности.

Основная причина значимых погрешностей в расчетах параметров конвекции заключается в некорректности исходных данных. В расчетах используются данные зондирования в 00 часов по согласованному европейскому времени (по Московскому времени – 03 часа). Расстояние между пунктами зондирования, даже в наиболее освещенных в метеорологическом отношении

районах, составляет не менее 100-150 км. Такая дискретность наблюдений не позволяет получать репрезентативные данные для всего физико-географического разнообразия территории и не отражает в достаточной степени изменения рассчитываемых характеристик за счет суточного хода.

Для минимизации влияния указанных факторов были использованы данные со специализированных космических аппаратов и дистанционно пилотируемых летательных аппаратов.

Космические технологии в метеорологии позволяют получать информацию в глобальном масштабе практически в непрерывном (дискретность 10-15 минут) интерактивном режиме. В рамках решаемой задачи использовались данные сканирующего радиометра AVHRR метеорологических спутников серии NOAA. Пространственное радиометрическое разрешение данного сканера 1,1 км, а чувствительность позволяет различить 1024 значения спектральной яркости. Прибор производит измерение собственного теплового излучения Земли и отраженного солнечного излучения в пяти спектральных каналах: 0,58-0,68 мкм (видимый диапазон), 0,72-1,0 мкм (ближний ИК диапазон), 3,55-3,93 (1,5-1,6) мкм (средний ИК диапазон), 10,3-11,3 и 11,5-12,5 мкм (дальний ИК диапазон). Многоканальность позволяет получать сведения об альбедо (точность 0,5 %) и радиационной температуре сканируемой поверхности (при 27°C точность 0,12°C). Обработка данных производилась штатным программным обеспечением комплекса приема и обработки спутниковой информации «Сюжет-МЦ». Рабочее окно данной программы в режиме «температура» приведено на рисунке 1.

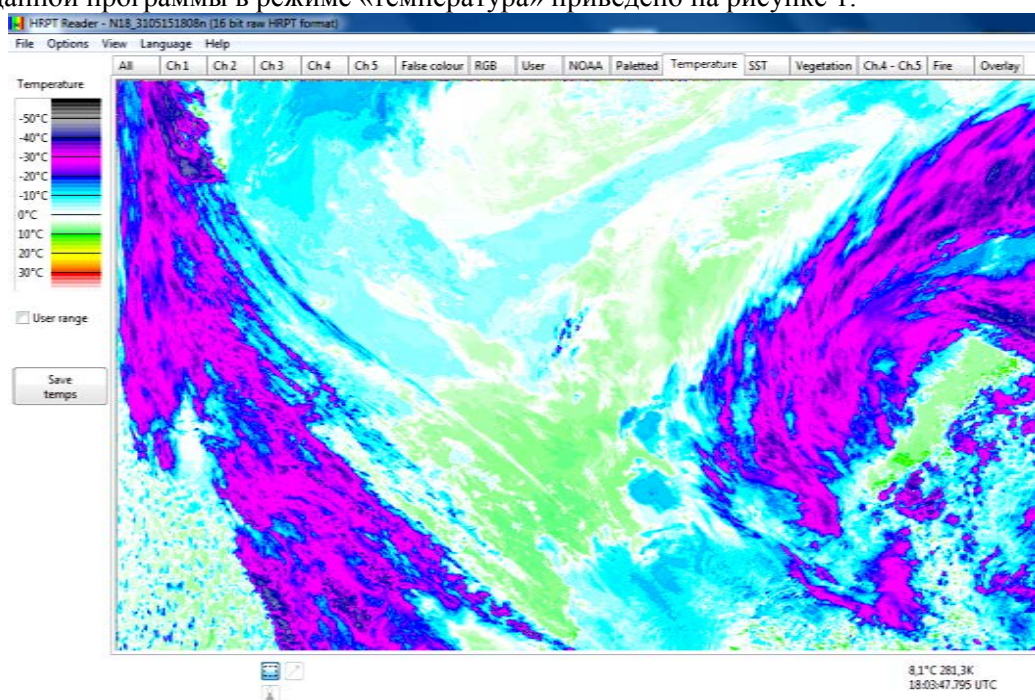


Рисунок 1. Поле температуры подспутниковой поверхности по данным сканирующего радиометра AVHRR космического аппарата NOAA-18 в обработке специализированной программной оболочки HRPT Reader.

С использованием данной программы оценивалась температура подстилающей поверхности в конкретной точке географического пространства. При оценке результатов расчетов по спутниковым снимкам за сроки, соответствующие максимальному развитию конвекции, оценивалась максимальная высота конвективных облаков.

Положительным фактором при применении спутниковой информации является масштабность, оперативность, широкоплановость и достаточно высокая детализация. К отрицательным сторонам следует отнести ограниченную доступность данных с подстилающей поверхности при наличии плотной облачности.

При решении задач в рамках мезомасштаба широкие возможности в плане детализации пространственно-временного распределения метеовеличин представляет использование информации с дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА).

В продолжение представленных исследований была проведена серия летных экспериментов по детализации пространственно-временного распределения значений основных метеорологических величин с борта ДПЛА самолетного типа ZALA 421-16EM. Комплекс позволяет получать информацию в интерактивном режиме в радиусе 50 км на протяжении до 2,5 часов в диапазоне высот до 3600 м с дискретностью в одну секунду.

Бортовое оборудование данного комплекса включает датчик температуры и влажности SHT21D, соответствующий современным стандартам форм-фактора и «интеллекта», что обеспечивает высокую точность, надежность и стабильность. Точность измерения относительной влажности датчиком составляет $\pm 2\%$, температуры – $\pm 0,3^\circ\text{C}$. Диапазон измерений – от 0% до 100% и от -40°C до 125°C , соответственно. Время отклика при измерении относительной влажности равно 8 секунд, температуры – от 5 до 30 секунд. Примеры графической интерпретации полетных файлов представлены на рисунке 2.

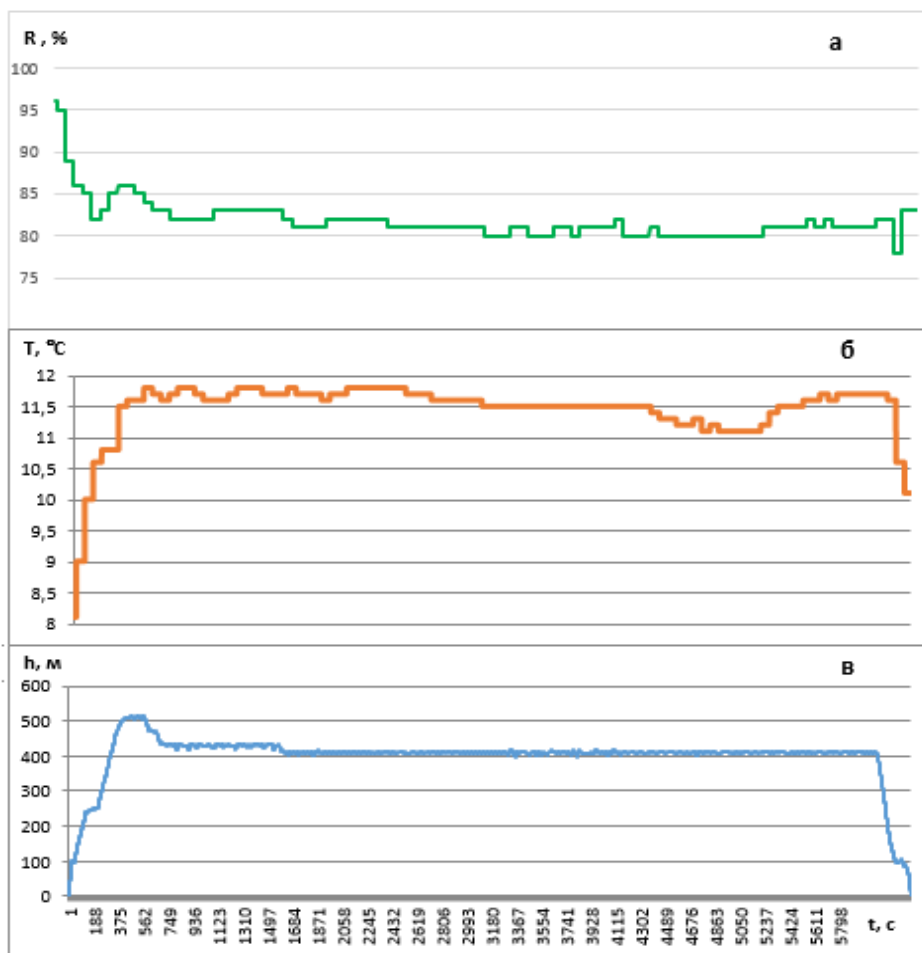


Рисунок 2. Графическое представление полетных файлов ДПЛА: а) относительная влажность воздуха, б) температура воздуха, в) профиль полета.

Использование данных с ДПЛА позволяет в режиме реального времени получать необходимые данные для прогноза конвекции. Так, из приведенного примера извлекается информация по пространственно-временному распределению значений температуры и влажности на участке размером 10 на 25 км за временной интервал 1 час 40 минут до высоты 500 метров – рисунок 3.

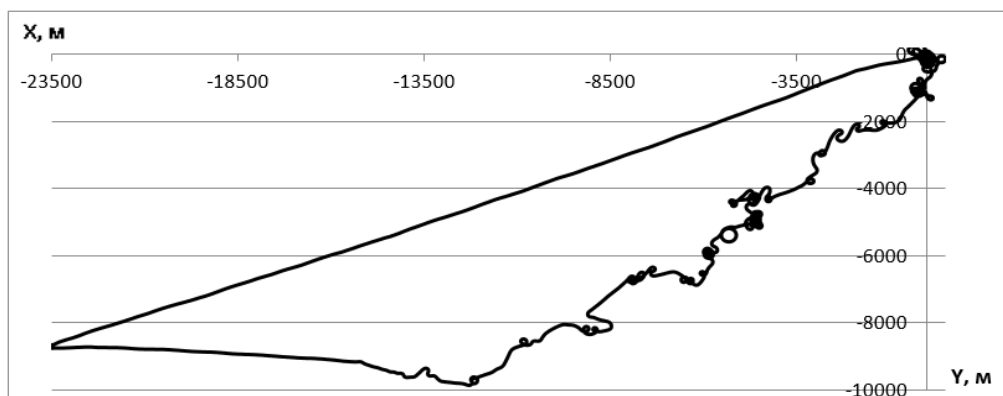


Рисунок 3. Схема маршрута полета.

Наблюдаются следующие существенные особенности поля температуры: инверсия до высоты 450 м интенсивностью от $3,4^{\circ}\text{C}$ (в начале полета) до $1,5^{\circ}\text{C}$ (при посадке); на юго-запад от точки старта с удаления 15-17 км наблюдается незначительное понижение температуры (до 1°C) – слабая адвекция холода (направление перемещения воздушного потока с азимута $220-240^{\circ}$); прогрев у поверхности земли составляет $1-1,5^{\circ}\text{C}/\text{час}$.

Влагосодержание воздуха высокое (более $9 \text{ г}/\text{м}^3$) и степень приближения к состоянию насыщения составляет 97%. С высотой (до 500 м) влажность плавно убывает в незначительной степени и к концу полета практически выравнивается во всем слое перемешивания.

Представленные данные существенно отличаются от данных утреннего зондирования и позволяют существенно скорректировать результаты расчетов.

3. Заключение

В целом при проведении численного эксперимента по проверке применимости данных дистанционного зондирования с МИСЗ и контактных измерений с ДПЛА (120 реализаций) погрешности в определении нижней границы конвективной облачности составили в среднем 154 м (при расчете по данным утреннего зондирования – 286 м), высоты верхней границы – 660 м (1270 м), вертикальной мощности облака – 711 м (1460 м).

При использовании уточненных данных существенно изменялись и значения предикторов, что привело к повышению оправдываемости прогноза гроз (способы Вайтинга, Фауста, Симиля) с $62,4-76,7\%$ до $72,3-89,0\%$. Необходимо также отметить, что отклонения от фактических параметров конвективной облачности практически во всем диапазоне высот не выходят за пределы прогностических градаций [3].

4. Литература

- [1] The Global Risks Report 2017, 12th Edition is published by the World Economic Forum within the framework of The Global Competitiveness and Risks Team [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www3.weforum.org/docs/GRR17_Report_web.pdf (18.11.2017).
- [2] Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.meteor.ru/upload/pdf_download/Доклад2016.pdf (18.11.2017).
- [3] Скирда, И.А. Авиационные прогнозы погоды: учебник / И.А. Скирда, И.И. Ульшин, А.Б. Мартышкин, В.А. Мозиков. – Воронеж: Изд. ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014. – 477 с.

Modeling of atmospheric convection using remote sensing data

I. P. Rastorguev¹, D. A. Surkov²

¹Air Force Academy. prof. N.E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin, Starykh Bolshevikov 54A, Voronezh, Russia, 394064

²Military unit 34244, Eroshenko 94, Samara, Russia, 443086

Abstract. Proposed in the classical model of atmospheric convection, the use of operational data from remotely piloted aircraft and specialized space vehicles. The results of numerical experiment have shown the feasibility of this approach.

Keywords: Model convection, Remote sensing of the earth, A priori information.