

УДК 551.509.32:551.515.4

## МЕТОДИКА ПРОГНОЗА КОНВЕКТИВНЫХ ОПАСНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПО КОМПЛЕКСУ СПУТНИКОВЫХ И АЭРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

<sup>1</sup>Неижмак А.Н., <sup>2</sup>Расторгуев И.П.

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

<sup>2</sup>ФГКВОВУ 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 приводятся результаты работы, проведенной авторами по решению задачи сверхкраткосрочного прогнозирования и мониторинга опасных явлений погоды, сопровождающих кучево-дождевую облачность. Задача возникла в рамках оперативного метеорологического обеспечения авиации Вооруженных Сил. Проведенный анализ используемых определений позволил остановиться на терминах, используемых Росгидрометом. Выполнен поиск существующих подобных методик, определены их недостатки в рамках решаемой задачи. Определены наиболее подходящие исходные данные. В частности, выделены результаты космического зондирования поверхности планеты. В работе используется информация о радиационной температуре и отражательной способности (альбедо) верхней границы кучево-дождевой облачности. В качестве метода исследования рассматривается инструмент математической статистики – дискриминантный анализ. Описана полученная архивная выборка, обосновано использование в исследовании конкретных исходных признаков. Детально разобрана процедура отбора предикторов для построения прогностического правила со ссылкой на нормативные документы. Приведены этапы построения решающего правила со строгим обоснованием выполняемых шагов. Выделение из исходных данных контрольного массива позволило объективно оценить успешность полученной прогностической функции. Показатели, по которым проводилась оценка эффективности, и их критерии, взяты из руководящего документа. Осуществлено испытание прогностической функции на независимом материале, сделаны выводы. Предложена методика сверхкраткосрочного прогноза и мониторинга опасных явлений погоды, генерируемых кучево-дождевой облачностью. Она базируется на разработанной прогностической функции. Анализ результатов позволил выделить положительные и отрицательные стороны. Также даны рекомендации по применению полученной методики в практической деятельности метеорологических подразделений авиации Вооруженных Сил.

**Ключевые слова:** кучево-дождевая облачность, опасное явление погоды, спутниковые данные, прогноз, успешность, методика

## THE METHODOLOGY FOR FORECASTING CONVECTIVE WEATHER HAZARDS ON THE COMPLEX OF SATELLITE AND AEROLOGICAL DATA

<sup>1</sup>Neizhmak A.N., <sup>2</sup>Rastorguev I.P.

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

<sup>2</sup>Military 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 presents the results of the work carried out by the authors to solve the problem of short-term forecasting and monitoring of dangerous weather phenomena accompanying cumulonimbus clouds. The task arose in the framework of operational meteorological support of aviation of the Armed Forces. The analysis of the definitions used allowed us to dwell on the terms used by Roshydromet. The search for existing similar methods was performed, their shortcomings within the framework of the problem being solved were identified. The most suitable initial data are determined. In particular, the results of space sensing of the planet's surface are highlighted. The paper uses information about radiation temperature and reflectivity (albedo) of the upper boundary of cumulonimbus clouds. As a method of research, we consider the classical tool of mathematical statistics – discriminant analysis. The obtained archive sampling is described, the use of specific initial features in the study is justified. The procedure of selection of predictors for building a prognostic rule with reference to normative documents is analyzed in detail. Stages of construction of the decision rule with strict justification of the performed steps are given. The selection of the control array from the initial data allowed to objectively assess the success of the obtained prognostic function. The indicators for which the performance was assessed and their criteria are taken from the guidance document. The test of prognostic function on independent material is carried out, conclusions are drawn. The technique of short-term forecast and monitoring of dangerous weather phenomena generated by cumulonimbus clouds is proposed. It is based on the developed prognostic function. Analysis of the results allowed to identify the positive and negative sides. Recommendations on the application of the resulting methods in practical activities of the meteorological units of aviation of the Armed Forces.

**Keywords:** cumulonimbus, dangerous weather, satellite data, forecast, success, methods

Прогностические алгоритмы, применяемые специалистами метеорологической службы, в настоящее время позволяют с до-

статочной точностью предсказывать динамику развития синоптических процессов крупного и регионального масштабов. В то

же время локальные проявления погоды, такие как порывы ветра в приземном слое, аномальное количество осадков, град, грозовая деятельность как в зоне атмосферных фронтов, так и внутри воздушной массы, не всегда успешно прогнозируются. Кроме того, вследствие дискретности сети метеорологических станций указанные мезомасштабные явления в некоторых случаях не фиксируются [1]. Однако данные явления обладают существенным разрушительным потенциалом и наносят значительный ущерб инфраструктуре военных объектов, оказывают влияние на безопасность жизнедеятельности войск, а также причиняют существенный материальный урон многим другим областям человеческой деятельности.

Опасные явления погоды, вызывающие разрушения на земле, еще большую опасность представляют для воздушных судов, находящихся в воздухе, поэтому авиационная отрасль во многом является наиболее чувствительной к метеорологическим условиям. В основном это обусловлено опасностью грозовой деятельности, ветра большой скорости, интенсивными осадками, турбулентностью, обледенением воздушного судна [2].

Кучево-дождевая облачность, достигшая в своем развитии максимальной стадии, способна к генерации подавляющего большинства опасных явлений погоды. Явления погоды конвективного происхождения, связанные с кучево-дождевой облачностью, зачастую представляют опасность не только для полетов авиации, но и практически для всех сфер жизнедеятельности. Указанные явления погоды локальны, кратковременны, внезапно возникают, несут с собой огромный разрушительный потенциал и, кроме того, механизм их образования очень сложен. Вышеперечисленное требует особого внимания к прогнозированию этих явлений, благодаря чему возможно снижение потерь и ущербов, связанных с ними, и повышение качества метеорологического обеспечения авиации.

Современный эффективный метод прогноза опасных метеорологических явлений, доступный при метеорологическом обеспечении авиации, окажет существенную помощь специалистам-синоптикам при мониторинге указанных явлений. Данный факт, очевидно, обусловит повышение качества рассматриваемого вида обеспечения, что, в свою очередь, будет способствовать минимизации ущерба воздушным судам и инфраструктуре аэродрома.

### Материалы и методы исследования

Определение и критерии опасных метеорологических явлений указаны в [3], оно и будет применяться в работе, обозначенное как ОЯ.

Вероятность возникновения и развития кучево-дождевой облачности главным образом связана с наличием влажного и теплого неустойчивого воздуха. Его подъем в атмосфере в результате конвекции и приводит к образованию мощной облачности вертикального развития. Физическая сущность данного процесса описана моделями конвекции [4].

Также в развитии кучево-дождевых облаков большую роль играет вертикальный градиент температуры в окружающей атмосфере. Охлаждение воздуха с высотой обуславливает контраст температур между окружающим и поднимающимся облачным воздухом, что приводит к возникновению силы плавучести. Температура внутри развивающегося облака выше температуры окружающего безоблачного воздуха благодаря выделению скрытой теплоты конденсации.

В реальной атмосфере процесс образования кучево-дождевых облаков еще более сложен, что связано с непрерывным перемешиванием поднимающегося теплого облачного воздуха с окружающим сухим более холодным воздухом окружающей атмосферы.

Анализ существующих подходов к прогнозу ОЯ конвективного происхождения, описанных в научных трудах, позволил выделить некоторые из них.

В Гидрометцентре А.А. Алексеевой разработана «Методика прогноза опасных и стихийных конвективных явлений погоды, а также их совокупности, приносящих значительный ущерб отраслям экономики» [5]. Кроме того известен полученный А.А. Алексеевой и Н.И. Глушковой «Способ прогноза стихийных гидрометеорологических явлений теплого полугодия» [6].

Неудобство обоих описанных подходов заключается в необходимости использования исходных данных, получаемых в ходе сложных расчетов. Поэтому их не всегда можно применить в оперативной практике метеорологических подразделений низового звена.

Для устранения данной сложности необходимо поиск новых путей прогнозирования опасных конвективных явлений погоды с рассмотрением в качестве исходных данных информации, доступной в деятельности метеорологических подразделений.

В рамках поставленной задачи целесообразно рассмотреть информацию космического зондирования, поступающую в метеорологические подразделения Вооруженных Сил. Данный вид информации позволяет по косвенным признакам оценивать интенсивность развития кучево-дождевой облачности, а соответственно, и явлений, генерируемых ею. Кроме того спутниковая информация регулярна, оперативна, охватывает большие территории, не ограничиваясь государственной принадлежностью или поверхностью суши. А цифровой формат получаемой информации дает возможность применения различных математических подходов к анализу структуры зондируемой поверхности [7].

Таким образом, видится целесообразность рассмотрения результатов зондирования с метеорологических космических аппаратов (КА) в качестве входных параметров при разработке способа прогноза ОЯ конвективного происхождения.

Вместе с тем, учитывая физику образования конвективных облаков, было принято решение об использовании в качестве предикторов аэрологических данных.

В ходе исследования была сформирована выборка исходных данных, в которой фактам наличия и отсутствия конвективных ОЯ были соотнесены значения температуры воздуха, дефицита точки росы, параметров ветра на изобарических поверхностях 850, 700, 500 гПа и информация о радиояростной температуре и альbedo на верхней границе кучево-дождевой облачности, обусловившей генерацию ОЯ.

Данные наблюдений из космоса представлены результатами измерений радиометра AVHRR спутников орбитальной группировки NOAA. Рассогласование по времени между фактами наблюдения ОЯ и зондированием с метеорологических КА не превышало 2–3 ч.

Полученный массив данных содержит 30% случаев с наличием ОЯ, остальные – с отсутствием, то есть конвективные явления наблюдались, но не достигали критериев, указанных в [3].

С целью последующей оценки устойчивости результатов работы прогностического правила из выборки выделили фрагмент, который затем использовался как контрольный материал.

Вследствие необходимости получения прогностических заключений в категоричной альтернативной форме воспользовались инструментом дискриминантного анализа.

После вычисления критерия Махаланобиса, используемого в качестве показателя разделяемости классов, и коэффициентов корреляции между предикторами была реализована процедура отбора предикторов, и из предварительного перечня были отсеяны исходные признаки с малыми значениями критерия Махаланобиса и из групп сильно связанных предикторов оставили по одному.

В окончательный список входных параметров вошли 6 предикторов: меридиональная составляющая вектора ветра  $V_{500}$  и дефицит точки росы  $D_{500}$  на поверхности 500 гПа, радиационная температура в четвертом спектральном канале  $T_4$  и альbedo в первом  $A_1$  и третьем  $A_3$  каналах радиометра AVHRR, измеренные на верхней границе облачности, а также дефицит точки росы  $D_{850}$  на поверхности 850 гПа.

Однако включение в прогностическую схему всех шести предикторов не позволит получить эффективный алгоритм, поэтому была реализована процедура просеивания [4].

Согласно [8] успешность прогностических алгоритмов оценивается при помощи различных показателей. Для оценки качества альтернативных прогностических методик в числе прочих используется показатель  $(U_+ + P_+)$ , представляющий собой сумму повторяемости оправдавшихся прогнозов на наличие явления по отношению к общему числу случаев прогноза наличия явления и предупреденность о случаях с явлением. Критериальным значением данного показателя в [8] указана величина 130%, при превышении которого качество прогностического алгоритма считается удовлетворительным.

По результатам отбора предикторов были составлены дискриминантные функции и оценена их эффективность по контрольной выборке. Результаты представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что включение в прогностическую схему даже пяти предикторов ведет к ухудшению качества (уменьшению прогностической информации), то есть наиболее эффективно использование четырех предикторов, входящих в выражение

$$L = -14,31 - 0,17T_4 + 0,06A_1 + 0,04A_3 - 0,16D_{850}.$$

Данный набор исходных признаков представляет собой оптимальное сочетание первичной совокупности, позволяющей наилучшим образом осуществить альтернативный прогноз ОЯ конвективного происхождения. Если значение прогностической функции положительное, в прогнозе сле-

дует указывать образование конвективных ОЯ, иначе следует ожидать возникновение конвективных явлений, но не достигающих критериев ОЯ.

Физический смысл включения в прогностическую схему указанных предикторов заключается в следующем:

- малое значение дефицита точки росы в нижнем слое тропосферы характеризует высокое влагосодержание, что через теплоту конденсации определяет энергетику конвективного облака. Кроме того, характеристики влагосодержания сильно коррелируют с интенсивностью выпадающих осадков;

- низкие значения радиационной температуры на вершине конвективного облака обуславливаются высотой ее расположения, то есть вертикальной мощностью;

- альbedo вершины кучево-дождевой облачности обусловлено в числе прочего высотой развития облака и микрофизической структурой.

Вошедшие в прогностическое правило предикторы отражают в большей степени состояние кучево-дождевой облачности, способной к генерации конвективных ОЯ, чем прогноз ее развития до такого состояния, то есть полученная дискриминантная функция предназначена для мониторинга ОЯ конвективного происхождения и их сверхкраткосрочного прогнозирования.

#### Результаты исследования и их обсуждение

В целях оценки эффективности полученной дискриминантной функции были проведены ее испытания на контрольной выборке и определены указанные в [8] показатели успешности: общая оправдываемость U, оправдываемость на наличие U<sub>+</sub> и отсутствие явления U<sub>-</sub>, критерии Обухова Q и Багрова Н, предупреденности о случаях с явлением П<sub>+</sub> и без явления П<sub>-</sub>, а также критерий качества Пирси – Обухова Т. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Результаты испытаний позволяют говорить о практической значимости и надежности разработанной методики прогноза конвективных ОЯ. Провести сравнение полученной методики с существующими на данном этапе не представляется возможным ввиду ограниченности архивной выборки по набору исходных признаков.

Анализ полученных результатов испытаний разработанной методики прогноза ОЯ конвективного происхождения свидетельствует о соответствии ее требованиям руководящих документов. Данный факт, в свою очередь, обосновывает возможность использования в оперативной деятельности метеорологических подразделений в качестве вспомогательных.

Реализация предлагаемой методики возможна по схеме, представленной на рисунке.

#### Заключение

Таким образом, в представленной работе получена методика, позволяющая специалисту метеорологической службы осуществлять сверхкраткосрочное прогнозирование и мониторинг опасных метеорологических явлений конвективного происхождения. Данная методика дает возможность предсказывать факт возникновения ОЯ, генерируемых кучево-дождевой облачностью и приводящих к катастрофическим последствиям, с заблаговременностью до трех часов.

Таблица 1

Результаты расчета показателя успешности «лучших» прогностических уравнений на каждом шаге отбора по значениям контрольной выборки

Прогностическое уравнение	Значение показателя успешности
$L = -9,42 - 0,19T4$	110
$L = -11,40 - 0,18T4 + 0,03A1$	111
$L = -14,92 - 0,17T4 + 0,06A1 + 0,04A3$	125
$L = -14,31 - 0,17T4 + 0,06A1 + 0,04A3 - 0,16D850$	135
$L = -14,49 - 0,17T4 + 0,05A1 + 0,04A3 - 0,16D850 - 0,03D500$	120

Таблица 2

Показатели успешности разработанной методики прогноза конвективных ОЯ

Показатель успешности	U	U <sub>+</sub>	U <sub>-</sub>	Q	Н	П <sub>+</sub>	П <sub>-</sub>	Т
Значение	80	53	94	0,47	0,51	82	79	0,61



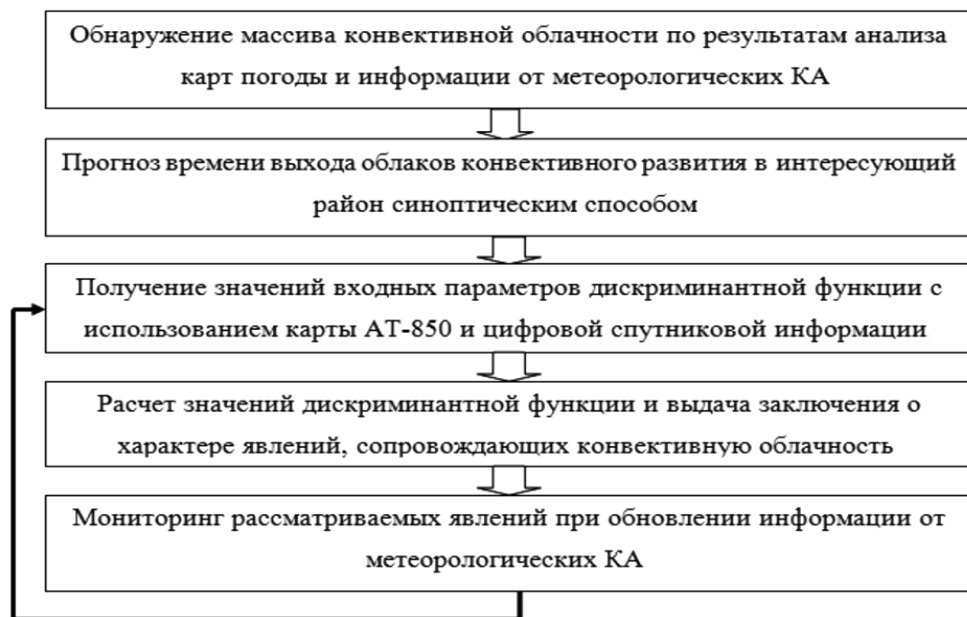


Схема реализации методики прогноза конвективных ОЯ

Выполненная оценка эффективности показала, что полученная методика прогноза ОЯ конвективного происхождения удовлетворяет требованиям руководящих документов, что свидетельствует о возможности ее применения в оперативной деятельности метеорологических подразделений в качестве вспомогательной.

#### Список литературы / References

1. Акимов Л.М., Расторгуев И.П., Неижмак А.Н., Мухина Т.А. Особенности прогнозирования опасных для авиации конвективных явлений погоды над юго-востоком Африки // Вестник Воронежского государственного университета. Серия География. Геоэкология. 2018. № 2. С. 103–110.
2. Akimov L.M., Rastorguev I.P., Neizhmak A.N., Mueykina T.A. Features of forecasting dangerous for aviation convective weather phenomena over South-East Africa // Bulletin of Voronezh state University. Series Geography. Geoecology. 2018. № 2. P. 103–110 (in Russian).
3. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: Триада лтд, 2016. 312 с.
4. Shalina N.P., Ivanova A.R. Forecasting meteorological conditions for aviation. M.: Triada ltd, 2016. 312 p. (in Russian).
5. РД 52.27.724 – 2009. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. 66 с.
6. Skirda I.A., Ulshin I.I., Mart'yaishkin A.B. Авиационные прогнозы погоды. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014. 477 с.

Skirda I.A., Ulshin I.I., Mart'yaishkin A.B. Aviation weather forecasts. Voronezh: VUNC VVS «VVA», 2014. 477 p. (in Russian).

5. Алексеева А.А. Методика прогноза опасных и стихийных конвективных явлений погоды, а также их совокупности, приносящих значительный ущерб отраслям экономики / Методический кабинет Гидрометцентра. [Электронный ресурс]. URL: <http://method.meteorf.ru/danger/economy/economy.html> (дата обращения: 14.02.2019).

Alekseeva A.A. Methods of forecasting dangerous and natural convective weather events, as well as their combination, causing significant damage to the economy / Methodical office Hydrometeorological Center. [Electronic resource]. URL: <http://method.meteorf.ru/danger/economy/economy.html> (date of access: 14.02.2019) (in Russian).

6. Алексеева А.А., Глушкова Н.И. Способ прогноза стихийных конвективных гидрометеорологических явлений теплого полугодия // Патент РФ № 2162237. Патентообладатель Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации. 2001. Бюл. № 2.

Alekseeva A.A., Glushkova N.I. Method of forecasting natural convective hydrometeorological phenomena of the warm half of the year // Patent RU № 2162237. Patent holder Hydrometeorological research center of the Russian Federation. 2001. Bul. № 2 (in Russian).

7. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2013. 592 с.

Shovengerdt R.A. Remote sensing. Models and methods of image processing. M.: Tehnosfera, 2013. 592 p. (in Russian).

8. РД 52.27.284–91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. СПб.: Гидрометеоздат, 1991. 150 с.