

ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ  
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

**МАРЧУКОВСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ – 2017**

25 июня – 14 июля 2017 года

**Труды**

Редакционная коллегия

академик РАН Анатолий Николаевич Коновалов  
академик РАН Евгений Евгеньевич Тыртышников  
член-корр. РАН Юрий Викторович Василевский  
член-корр. РАН Сергей Игоревич Кабанихин  
член-корр. РАН Геннадий Алексеевич Михайлов  
член-корр. РАН Владимир Викторович Шайдуров  
д.ф.-м.н. Юрий Миронович Лаевский  
д.ф.-м.н. Владимир Викторович Пененко  
д.ф.-м.н. Максим Александрович Шишленин  
д.ф.-м.н. Михаил Александрович Марченко

Ответственный редактор

д.ф.-м.н. Игорь Михайлович Куликов

Новосибирск  
ИВМиМГ СО РАН  
2017

# СТАТИСТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗА ОБЛЕДЕНЕНИЯ

М. А. Волкова<sup>1</sup>, Н. К. Барашкова<sup>1</sup>, И. В. Кужевская<sup>1</sup>,  
Л.И. Кижнер<sup>1</sup>, А. В. Старченко<sup>1,2</sup>, А. А. Барт<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, Томск*

<sup>2</sup> *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, Томск*

УДК 551.509.54+ 519.6

В статье представлены результаты оперативного прогнозирования зон потенциального обледенения воздушных судов на основе использования гидродинамического моделирования состояния пограничного слоя над аэродромом Томск. В результате исследования рассмотренные прогностические алгоритмы были ранжированы по степени их успешности применения в статистической интерпретации. Наиболее перспективным алгоритмом для прогноза обледенения воздушных судов признан алгоритм К. Годске.

**Ключевые слова:** мезомасштабная модель, РР-концепция, постпроцессинг.

## Введение

Оперативные численные модели прогноза погоды, как правило, не предсказывают в явном виде важных для практики авиационной метеорологии величин и явлений, в частности обледенения воздушных судов. В постпроцессинге модельных переменных прогностические показатели рассчитываются с помощью статистических методов [1]. Статистическая интерпретация результатов численного прогноза является необходимым этапом при получении прогностической продукции. Использование этого этапа численного прогноза стало актуальным после того как прогноз полей давления в тропосфере стал устойчиво достигать приемлемого уровня оправдываемости. С тех пор началась разработка объективных методов интерпретации гидродинамических прогнозов в терминах элементов погоды [2]. Существует несколько концепций применения статистических методов для разработки и интерпретации результатов моделирования. Современные методы статистического анализа и прогноза погоды и опасных ее явлений допускают применение двух концепций — в одной используется статистики «идеального» прогноза (Perfect Prognos Methods — РР), в другой — прогнозы конкретных гидродинамических моделей (Model Output Statistics Methods — МОS). Данные концепции идентичны по используемому статистическому аппарату и различаются способами формирования обучающих выборок. В нашей работе использовалась методология РР-концепции, которая предполагает получение устойчивых оценок диагностических (синхронных и асинхронных) связей между рассматриваемыми элементами или явлениями погоды и значениями ряда характеристик атмосферы, определяемых по фактическим данным на архивном материале. Выявленные диагностические соотношения, например, в виде уравнений регрессии, дискриминантных функций переносятся на связи между элементами погоды и прогностическими переменными, которые снимаются с прогностических карт, рассчитанных с помощью той или иной гидродинамической модели.

Достоинства РР-концепции: статистические зависимости строятся на основе архивных данных за большой период метеорологических наблюдений; качество прогнозов элементов и явлений погоды автоматически повышается при улучшении качества используемых гидродинамических моделей; не требуется пересчета уравнений статистических зависимостей при внедрении в практику новой гидродинамической модели.

Недостатки РР-концепции: основным методическим недостатком является то, что в ней не учитываются ошибки конкретной гидродинамической модели, из которой при оперативном использовании берутся значения предикторов. Статистические зависимости выстраиваются на фактическом материале, а при

оперативном использовании полученные связи в «чистом» виде переносятся на прогностические поля, из которых выбираются необходимые предикторы для прогноза метеорологических величин и явлений погоды. При этом допускается, что прогностические поля отражают те же особенности пространственно-временного распределения метеорологических величин и условий циркуляции, что и фактические.

В нашей работе представлены результаты статистической интерпретации прогностической продукции гидродинамических моделей для численного прогноза опасного для авиации явления — обледенения. В качестве физико-статистических зависимостей были привлечены алгоритм К. Годске [3], дискриминантная функция Гидрометцентра РФ [3] и количественные интервалы температуры воздуха и относительной влажности, предложенные NCEP (National Centers for Environmental Prediction, USA) [4].

## 1 Численный метод

Мезомасштабная модель TSU-NM3 на основе выходной продукции глобальной модели Гидрометцентра РФ ПЛАВ [5] (за срок 00 ВСВ на уровнях 1000, 925 и 850 гПа), выдает прогноз составляющих скорости ветра и температурно-влажностных характеристик на 29 уровнях (от 9,7 м до 2500 м) в пограничном слое атмосферы в районе аэродрома Томск. Некоторые из основных особенностей и опций модели TSU-NM3, используемой для прогноза обледенения, перечислены в [6].

На основе результатов численного прогноза этих величин с использованием физико-статистических зависимостей (разработанных в рамках РР-концепции) прогнозируются зоны обледенения с часовой дискретностью, которые представляют собой, на сегодняшний момент, текстовые файлы. Выходные данные модели TSU-NM3 представляют собой часовой профиль компонент скорости ветра ( $U$ ,  $V$ ,  $W$ , м/с), температурно-влажностных характеристик ( $T$ , °C;  $Q_{air}$ , кг/кг и др.), и, непосредственно, показателей наличия/отсутствия обледенения по методу Годске, методу NCEP и по значениям дискриминантной функции L850.

В дальнейшем будем использовать следующие обозначения полей:  $H(M)$  — значение высоты поверхности над уровнем моря, м;  $ZPHYS(M)$  — высота над поверхностью Земли, м;  $U$  — долготная компонента скорости, м/с;  $V$  — широтная компонента скорости, м/с;  $W$  — вертикальная компонента скорости, м/с;  $T$  — температура воздуха, °C;  $Q_{air}$  — удельная влажность воздуха, кг/кг;  $QRAIN$  — содержание дождевой влаги в атмосфере, кг/кг;  $QCLOUD$  — содержание облачной влаги в атмосфере, кг/кг;  $Td(C)$  — температура точки росы, °C;  $Godske$  — параметр Годске:  $T + 8 \cdot (T - Td)$ , если он  $< 0$ , то прогнозируется обледенение;  $icing$  — параметр (0 ∨ 1), характеризующий обледенение по Годске. Если  $icing = 1$ , то обледенение прогнозируется на данном уровне;  $L850$  — дискриминантная функция для прогноза обледенения, разработанная Гидрометцентром РФ. Если  $L850 < 0$ , то прогнозируется обледенение на высоте  $H850 \pm 500$  м;  $H850$  — высота, на которой рассматривается дискриминантная функция, м;  $iUSA$  — параметр (0 ∨ 1), характеризующий обледенение самолета по методике, разработанной в NCEP. Если  $iUSA = 1$ , то обледенение прогнозируется на данном уровне;  $RH$  — относительная влажность воздуха, %.

Апробация мезомасштабной модели для прогноза обледенения воздушных судов [6, 7] и статистическая интерпретация результатов проводилась на основе базы данных бортовой погоды PIREPs (pilot reports) о случаях обледенения в районе аэродрома Томск (в радиусе до 150 км) с 2011 по 2015 год. В этот период наблюдалось 276 дней с обледенением. Наибольшее число дней было зафиксировано в октябре и декабре — 32,3 и 32,9 %, соответственно. Чаще всего наблюдалось обледенение умеренной интенсивности (136 дней) и слабой (125 дней), дни с сильным обледенением (15 дней) регистрировались с октября по май.

Использование мезомасштабной модели TSU-NM3 позволяет получить прогностические значения характеристик элементов погоды/предикторов, используемых при прогнозе зон обледенения воздушных судов в пограничном слое атмосферы в районе аэродрома Томск с заблаговременностью до 40 часов.

## 2 Результаты

В качестве типичного примера продемонстрируем результаты модельных расчетов для двух дней 10 и 11 марта 2015 года (рис. 1).

По информации бортовой погоды (PIREPs) с 10 часов UTC 10 марта до 12 часов UTC 11 марта было зафиксировано обледенение (слабое, в облаках) в слое от 600 до 3000 м. Согласно данным [8] 10.03.2015 в 08.34 UTC вертолет Robinson R-44 потерпел аварию в районе примерно 45–50 км от Новосибирска. По предварительным данным, причиной аварии стало обледенение воздушного судна.

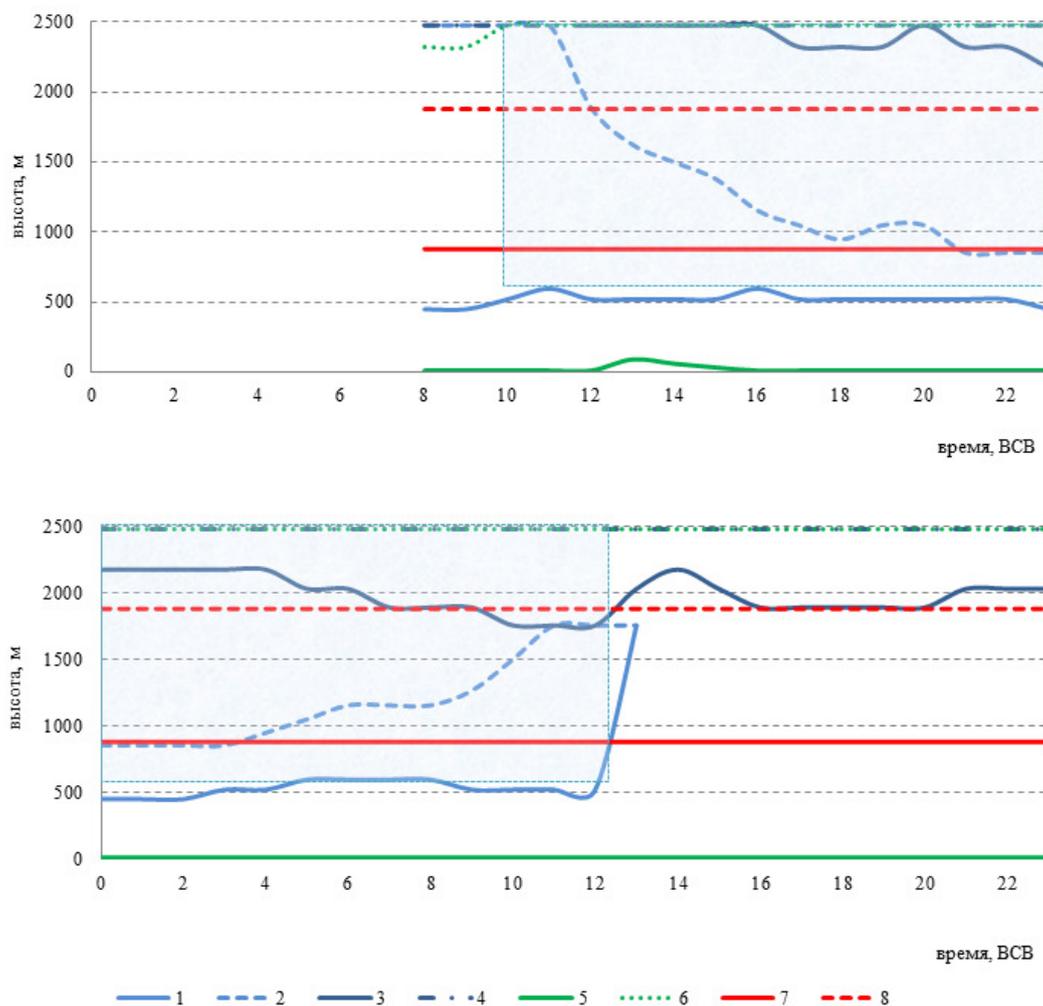


Рис. 1: Результаты моделирования за 10 и 11 марта 2015 года. Нижняя (1) и верхняя (2) граница первого слоя обледенения по методу Годске, нижняя (3) и верхняя (4) граница второго слоя обледенения по методу Годске, нижняя (5) и верхняя (6) граница слоя обледенения по методу NCEP, нижняя (7) и верхняя (8) граница слоя обледенения по методу Гидрометцентра РФ, выделенный блок — зона обледенения согласно данным бортовой погоды.

В этот период времени юго-восток Западной Сибири находился в передней теплой части барической ложбины глубокого малоподвижного циклона с центром над Новой Землей. Наблюдалась адвекция теплого и влажного воздуха в системе фронтов окклюзии. Наблюдалась облачность 8 октантов, преимущественно слоисто-кучевых (*Stratocumulus*) и кучево-дождевых форм (*Cumulonimbus*), временами осадки в виде ливневого снега. Приземная температура воздуха отмечалась в диапазоне от  $-7,7$  до  $+0,7$  °C, а также высокая относительная влажность (80–95%). Рассмотренная ситуация характеризует наиболее часто встречающиеся условия образования обледенения при переходе от морозной погоды к оттепели.

Проведенные расчеты показали, что модель успешно спрогнозировала обледенение по всем трем рассматриваемым алгоритмам. Согласно алгоритма NCEP, обледенение прогнозировалось в течение обоих суток практически во всем слое от поверхности земли до высоты 2500 м. Исключение составляют несколько часовых сроков 10 марта, когда в срок 8–9 ч. ВСВ верхняя граница слоя обледенения находилась на уровне 2323 м, а нижняя граница слоя поднималась до уровня 89 м (в срок 13 ч. ВСВ). Метод Гидрометцентра РФ показал зону прогнозируемого обледенения в слое 880–1880 м (высота 850 гПа  $\pm$  500 м) на протяжении всего прогностического периода (с 8 ч. 10.03.2015 до 23 ч. ВСВ 11.03.2015). Данные расчетов модели TSU-NM3

отражают наличие обледенения и по алгоритму К.Годске в течение рассматриваемого периода. Показано, что две прогнозируемые зоны с обледенением имеют сложную пространственно-временную конфигурацию. Наблюдается почти полное совпадение нижней границы фактического и прогнозируемого обледенения, при этом модель дает расслоение по вертикали, но это данные бортовой погоды уже не отражают. Следует отметить, что 10 марта 2015 г. модель прогнозирует обледенение и на время зафиксированной аварии вертолета под Новосибирском. При этом факт обледенения не подтвержден информацией PIREPs в районе аэродрома Томск, который находится в пределах 150 км от места падения вертолета.

Для проверки качества прогноза обледенения проведен сравнительный анализ фактических случаев обледенения и модельных прогнозов для 36 дней с фактическим обледенением и без него для расчетных сроков 08, 12, 18 и 24 часа ВСВ. Для оценки качества используемых статистических алгоритмов и успешности прогнозов зон обледенения были использованы стандартные оценки, принятые в прогностической практике [1, 9]: оправдываемость прогнозов наличия и отсутствия явления, предупрежденность наличия и отсутствия явления, общая оправдываемость, критерий надежности Н.А. Багрова, критерий Пирса-Обухова.

Значения критериев указывают на удовлетворительную степень верификации модели. По всем трем алгоритмам расчета общая оправдываемость на сроки 08 и 12 ч. составила до 87,5 % (метод Годске); на расчетное время 24 ч общая оправдываемость уменьшается до 47–63 %. Оправдываемость прогноза отсутствия явления и предупрежденность факта наличия явления равная 100 % по методу NCEP свидетельствует об отсутствии неоправдавшихся прогнозов отсутствия явления. Наиболее низкие значения предупрежденности факта отсутствия явления с использованием критериев температуры и относительной влажности, предложенных NCEP, связаны с завышением числа случаев неоправдавшихся прогнозов наличия явления, когда явление прогнозировалось, но не наблюдалось. Таким образом, алгоритм NCEP «перестраховывается» и прогнозирует обледенение в большинстве рассмотренных дней и сроков. Это связано с используемым в методе достаточно широким диапазоном температуры и влажности ( $-16^{\circ}\text{C} \leq T \leq 0^{\circ}\text{C}$  и  $RH \geq 63\%$ ), способствующим обледенению. Данный диапазон является преобладающим в пограничном слое в холодном периоде года в районе исследования.

Таблица 1: Результаты оценки качества модельных прогнозов

	Алгоритм прогноза											
	Годске				Гидрометцентр				NCEP			
Заблаговременность, ч	2	6	12	18	2	6	12	18	2	6	12	18
Срок прогноза, ч ВСВ	08	12	18	24	08	12	18	24	08	12	18	24
Оправдываемость прогноза наличия явления	80	88,9	46,7	43,8	66,7	68	37,5	38,1	67,9	58,1	34,5	41,4
Оправдываемость прогноза отсутствия явления	75	85,7	76,5	0,5	80	85,7	75	0,7	100,0	100,0	66,7	90,0
Предупрежденность факта наличия явления	84,2	88,9	63,6	58,3	94,7	94,4	81,8	66,7	100,0	100,0	90,9	100,0
Предупрежденность факта отсутствия явления	69,2	85,7	81,3	55,0	30,8	42,9	28,6	35,0	30,8	7,1	9,5	15,0
Общая оправдываемость	78,1	87,5	62,5	56,3	68,8	71,9	46,9	46,9	71,9	59,4	37,5	46,9
Критерий надежности Н.А. Багрова	0,35	0,75	0,35	0,13	0,28	0,39	0,08	0,01	0,35	0,1	0,03	0,12
Критерий Пирса-Обухова	0,53	0,75	0,14	0,1	0,26	0,37	0,1	0,0	0,3	0,1	0,0	0,2

Оценка качества модели с применением критериев Багрова и Пирса-Обухова показала, что рассматри-

ваемые алгоритмы имеют практическую значимость для прогноза с заблаговременностью не более 6 часов. Полученные оценки качества прогнозов указывают на перспективность использования алгоритма Годске, тогда как методы Гидрометцентра и НСЕР требуют уточнения коэффициентов и критериев для территории прогноза. Вместе с тем, оценка успешности модельных прогнозов напрямую зависит не только от успешности моделей (ПЛАВ и TSU-NM3), но и от количества и качества источников первичной информации (бортовой погоды). Очевидно, что увеличение количества источников информации о фактах обледенения будет способствовать повышению объективности оценки качества модели. Таким образом, методика прогноза обледенения воздушных судов на основе выходной продукции численной модели TSU-NM3 показала возможность ее практического применения в оперативной работе. Она может быть положена в основу регионального метода прогноза обледенения воздушных судов.

## Заключение

Особенности сформированной базы данных позволили применить концепцию PP (Perfect Prognosis Methods) статистической интерпретации результатов численного прогноза элементов погоды с учетом полученных в мировой практике статистических зависимостей (алгоритмов) для прогноза обледенения воздушных судов. В результате исследования рассмотренные алгоритмы были ранжированы по степени их успешности применения в статистической интерпретации. Наиболее перспективным алгоритмом для прогноза обледенения воздушных судов нами обоснован алгоритм К. Годске. В дискриминантной функции Гидрометцентра РФ требуется уточнение ее коэффициентов с учетом региональных особенностей. Алгоритм, предложенный НСЕР (National Centers for Environmental Prediction, USA) и разработанный на основе применения количественных интервалов температуры воздуха и относительной влажности «перестраховывается» и прогнозирует обледенение в большинстве рассмотренных дней и сроков, что делает данный метод прогноза экономически не целесообразным. Используемый в алгоритме диапазон температуры и влажности ( $-16^{\circ}\text{C} \leq T \leq 0^{\circ}\text{C}$  и  $RH \geq 63\%$ ), способствующий обледенению и относящийся к общему случаю, может быть уточнен, исходя из вида облачности и уровня в пограничном слое [1].

## Список литературы

- [1] Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: Триада ЛТД, 2016.
- [2] Барашкова Н.К., Кижнер Л.И., Кузевская И.В. Атмосферные процессы: динамика, численный анализ, моделирование: Учебное пособие. Томск: Томский государственный университет, 2010.
- [3] Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации (ред. Абрамович К.Г., Васильев А.А.), Л.: Гидрометеиздат, 1985.
- [4] Schultz P., Politovich M. K. Toward the improvement of aircraft icing forecasts for the continental United States Weather and Forecasting. 1992. V. 7, iss. 9, P. 491–500.
- [5] Tolstykh, M.A., "Semi-Lagrangian high-resolution atmospheric model for numerical weather prediction // Russian Meteorology and Hydrology. 2001. V. 4, P.1–9.
- [6] Volkova M.A., Starchenko A.V., Kuzhevskaya I. V., Bart A.A., Kizhner L. I., Barashkova N. K. Forecast of icing zones using possibilities of hydrodynamic simulation for the atmospheric boundary layer // Proceedings of SPIE 10035, 22nd International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 1003567. 2016. doi: 10.1117/12.2249019
- [7] Sitnikov G.I., Starchenko A.V., Terenteva M.V., Barashkova N.K., Volkova M.A., Kuzhevskaya I.V., Kizhner L.I. Forecast of extreme weather conditions that promote aircraft icing during take-off or landing // Proceedings of SPIE, 21nd International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics 2015. Vol. 9680, 96806T.
- [8] Авиационные происшествия и инциденты за 2012-2015 // www.aviamettelecom.ru. 2015. URL: <http://www.aviamettelecom.ru> (дата обращения: 10.06.2016).

- [9] Collaboration for Australian Weather and Climate Research (CAWCR) // CAWCR. 2015. URL: <http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/> (дата обращения: 14.05.2016).

*Марина Александровна Волкова — к.г.н., доцент кафедры метеорологии и климатологии  
Томского государственного университета;  
e-mail: mv2101@mail.ru;*

*Надежда Константиновна Барашкова — к.г.н., доцент кафедры метеорологии и климатологии  
Томского государственного университета;  
e-mail: nkbar@sibmail.com;*

*Ирина Валерьевна Кужевская — к.г.н., доцент кафедры метеорологии и климатологии  
Томского государственного университета;  
e-mail: ivk@ggf.tsu.ru;*

*Любовь Ильинична Кижнер — к.г.н., доцент кафедры метеорологии и климатологии  
Томского государственного университета;  
e-mail: kdm@mail.tsu.ru;*

*Александр Васильевич Старченко — д.ф.-м.н., декан Механико-математического факультета  
Томского государственного университета;  
e-mail: starch@math.tsu.ru;*

*Андрей Андреевич Барт — к.ф.-м.н., доцент кафедры вычислительной математики и  
компьютерного моделирования Томского государственного университета;  
e-mail: bart@math.tsu.ru.*

*Дата поступления — 22 мая 2017 г.*