

О РЕЗУЛЬТАТАХ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДА ПРОГНОЗА ЗОН ВОЗМОЖНОГО ОБЛЕДЕНЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

В соответствии с Планом испытаний на 2009 год, в ГУ «Гидрометцентр России» проводились оперативные испытания метода прогноза зон возможного обледенения воздушных судов (ВС) по моделям ПЛАВ и NCER в период с 1 апреля по 31 декабря 2009 года. Метод является составной частью технологии расчета карты особых явлений (ОЯ) на средних уровнях атмосферы (Significant Weather at the Middle levels – SWM [7]) для авиации. Технология была разработана в Отделе авиационной метеорологии (ОАМ) в 2008 году в рамках темы НИР 1.4.1 для внедрения в Лаборатории зональных прогнозов. Метод применим также для прогноза обледенения на нижних уровнях атмосферы. Разработка технологии расчета прогностической карты ОЯ на нижних уровнях (Significant Weather at the Low levels – SWL) запланирована на 2010 год.

Обледенение воздушных судов может наблюдаться при необходимом условии, состоящем в наличии переохлажденных облачных капель в нужном количестве. Это условие не является достаточным. Чувствительность различных типов самолетов и вертолетов к обледенению неодинакова. Она зависит как от характеристик облака, так и от скорости полета и аэродинамических характеристик ВС [1, 6]. Поэтому прогнозируется лишь «возможное» обледенение в слоях, где выполняется его необходимое условие. Такой прогноз должен слагаться, в идеале, из прогноза наличия облаков, их водности, температуры, а также фазового состояния облачных элементов.

На ранних стадиях развития расчетных методов прогноза обледенения [6] их алгоритмы опирались на прогноз температуры и точки росы, синоптический прогноз облачности и статистические данные о микрофизике облаков и повторяемости обледенения ВС. Опыт показал, что такой прогноз в то время был малоэффективным.

Однако и впоследствии, вплоть до настоящего времени, даже лучшие численные модели мирового класса не обеспечивали надежного прогноза наличия облаков, их водности и фазы [11–13]. Поэтому прогноз обледенения в мировых центрах (для построения карт ОЯ; мы здесь не касаемся сверхкраткосрочного прогноза и наукастинга, состояние которых охарактеризовано в [9, 10, 12]) в настоящее время по-прежнему основывается на прогнозе температуры и влажности воздуха, а также, по возможности, простейших

характеристик облачности (слоистая, конвективная). Успешность такого прогноза, однако, оказывается практически значимой, поскольку точность предвычисления температуры и влажности воздуха сильно повысилась по сравнению с состоянием, соответствующим времени написания [6].

В [14] представлены основные алгоритмы современных методов прогноза обледенения. Для целей построения карт SWM и SWL нами были отобраны те из них, которые применимы к нашим условиям, т. е. базируются только на выходной продукции численных моделей. Алгоритмы расчета «потенциала обледенения», комбинирующие модельные и реальные данные в режиме наукастинга, в данном контексте неприменимы.

В качестве выборок данных об обледенении самолетов, использованных для оценки сравнительной успешности алгоритмов, перечисленных в [14], а также известных ранее (в том числе известной формулы Годске) [5, 6], были взяты:

1) данные системы TAMDAR, установленной на самолетах, летающих над территорией США в пределах нижних 20 тыс. футов;

2) база данных самолетного зондирования над территорией СССР в 60-х гг. XX столетия, созданная в 2007 г. в ОАМ в рамках темы 1.1.1.2 [5].

В отличие от системы AMDAR, система TAMDAR включает датчики обледенения и точки росы. Данные TAMDAR удалось собрать за период с августа по октябрь 2005 года, за 2006 год и январь 2007 года с сайта <http://amdar.noaa.gov>. С февраля 2007 года доступ к данным был закрыт для всех пользователей, кроме правительственных организаций США. Данные были собраны сотрудниками ОАМ и представлены в виде базы, пригодной для компьютерной обработки, путем ручной выборки с упомянутого выше сайта следующей информации: время, географические координаты, высота по GPS, температура и влажность воздуха, давление, ветер, обледенение и турбулентность.

Остановимся вкратце на особенностях системы TAMDAR, совместимой с международной системой AMDAR и оперативно работающей на самолетах гражданской авиации США с декабря 2004 года. Система разработана в соответствии с требованиями ВМО, а также NASA и NOAA США. Отсчеты датчиков производятся через заданные интервалы давления (10 гПа) на режимах набора высоты и снижения и через заданные промежутки времени (1 мин) на режиме горизонтального полета. Система включает многофункциональный датчик, устанавливаемый на передней кромке крыла самолета, и микропроцессор, обрабатывающий сигналы и передающий их в пункт обработки и распространения данных, расположенный на земле (система AirDat). Неотъемлемой частью является также спутниковая система GPS, работающая в реальном времени и обеспечивающая пространственную привязку данных.

Имея в виду дальнейший анализ данных TAMDAR совместно с данными ОА и численного прогноза, мы ограничивались выпиской данных только в окрестности ± 1 ч от сроков 00 и 12 ч ВСВ. Собранный таким путем массив данных включает 718417 отдельных отсчетов (490 дат), в том числе 18633 отсчета с наличием обледенения. Практически все они относятся к сроку 12 ч ВСВ. Данные группировались по квадратам широтно-долготной сетки размером $1,25^\circ \times 1,25^\circ$ и по высоте в окрестностях стандартных изобарических поверхностей 925, 850, 700 и 500 гПа. Окрестностями считались слои 300–3000, 3000–7000, 7000–14000 и 14000–21000 ф. соответственно. Выборка содержит 86185, 168565, 231393, 232274 отсчетов (случаев) в окрестностях 500, 700, 850 и 925 гПа соответственно.

Для анализа данных TAMDAR об обледенении необходимо учитывать следующую их особенность. Датчик обледенения фиксирует наличие льда слоем не менее 0,5 мм. С момента появления льда и до момента его полного исчезновения (т. е. в течение всего периода наличия обледенения) датчики температуры и влажности не работают. Динамика отложений (скорость нарастания) в этих данных не отражена. Таким образом, не только нет данных об интенсивности обледенения, но нет и данных о температуре и влажности за период обледенения, что предопределяет необходимость анализа данных TAMDAR совместно с независимыми данными об указанных величинах. В качестве таковых использовались данные ОА из базы ГУ «Гидрометцентр России» о температуре воздуха и относительной влажности. Выборка, включающая данные TAMDAR о предиктанте (обледенении) и данные ОА о предикторах (температуре и относительной влажности), будет обозначаться в данном отчете как выборка TAMDAR–ОА.

В выборку данных самолетного зондирования (СЗ) над территорией СССР были включены все отсчеты, содержащие информацию о наличии либо отсутствии обледенения, а также о температуре и влажности воздуха, независимо от наличия облаков. Поскольку в нашем распоряжении нет данных реанализа за период 1961–1965 гг., не было смысла ограничиваться окрестностями сроков 00 и 12 ч МСВ или окрестностями стандартных изобарических поверхностей. Данные самолетного зондирования, таким образом, использовались непосредственно как измерения *in situ*. Выборка данных СЗ включала более 53 тыс. отсчетов [4].

В качестве предикторов из данных численного прогноза использовались прогностические поля геопотенциала, температуры воздуха и относительной влажности с заблаговременностью 24 ч глобальных моделей: полулагранжевой (в узлах сетки $1,25^\circ \times 1,25^\circ$) и модели NCEP (в узлах сетки $1^\circ \times 1^\circ$) за периоды сбора информации и сравнения моделей в апреле, июле и октябре 2008 года (с 1 по 10 число месяца).

В результате получены следующие результаты, имеющие методическое и научное значение:

1. Температура и влажность воздуха (относительная влажность или температура точки росы) являются значимыми предикторами зон возможного обледенения ВС, при условии, что эти предикторы измерены *in situ* (рис. 1). Все испытываемые алгоритмы, включая формулу Годске, на выборке данных самолетного зондирования показали вполне практически значимую успешность разделения случаев наличия и отсутствия обледенения. Однако в случае данных TAMDAR об обледенении, дополненных данными объективного анализа температуры и относительной влажности, успешность разделения понижена, в особенности на уровнях 500 и 700 гПа (рис. 2–5), вследствие того, что значения предикторов осреднены по пространству (в пределах квадрата сетки $1,25^\circ \times 1,25^\circ$) и могут отстоять по вертикали и по времени от момента наблюдения на 1 км и 1 ч соответственно; сверх того, точность объективного анализа относительной влажности существенно понижается с высотой.

Самолетное зондирование

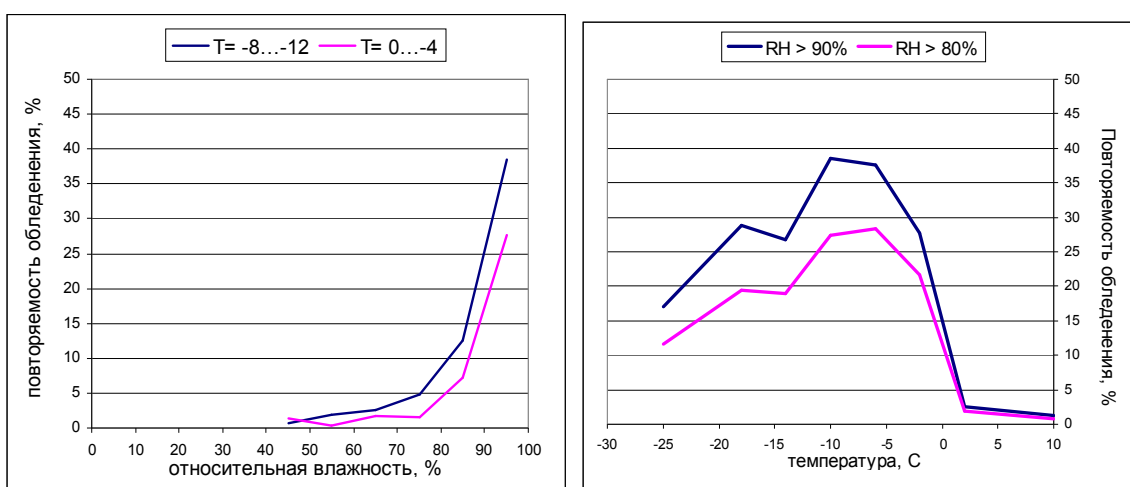


Рис. 1. Повторяемость обледенения в зависимости от относительной влажности в фиксированных интервалах температур (слева) и от температуры в фиксированных интервалах относительной влажности по данным самолетного зондирования.

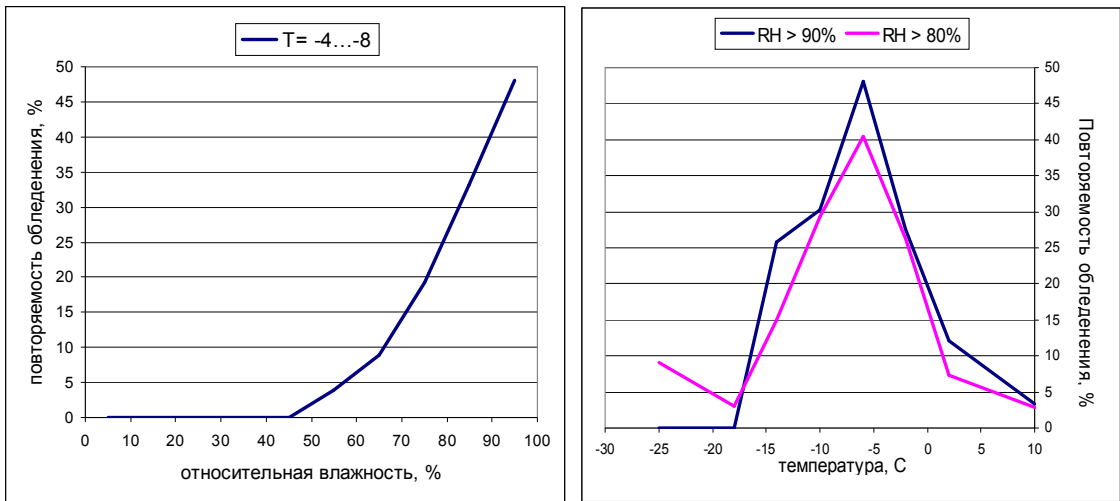


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но по данным TAMDAR–ОА на уровне 925 гПа.

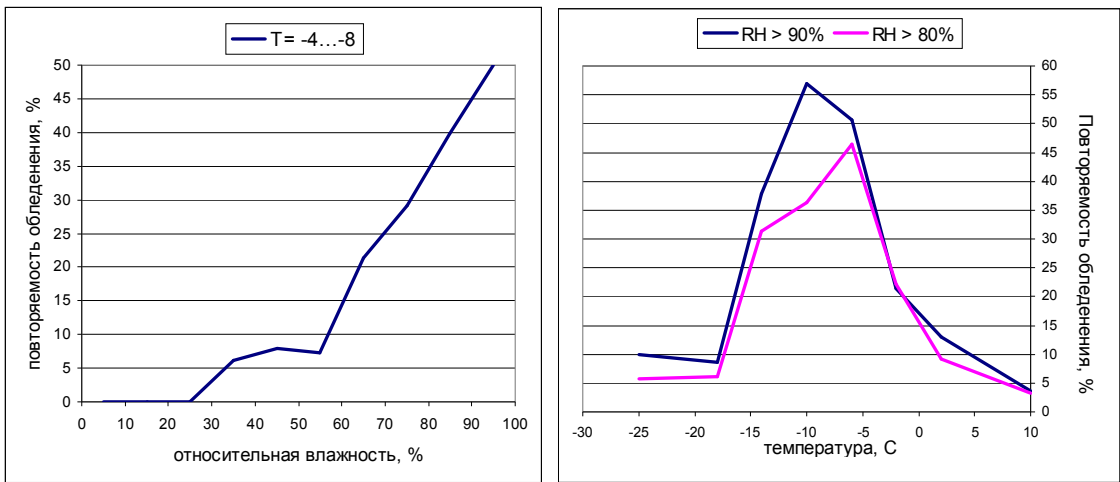


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но на уровне 850 гПа.

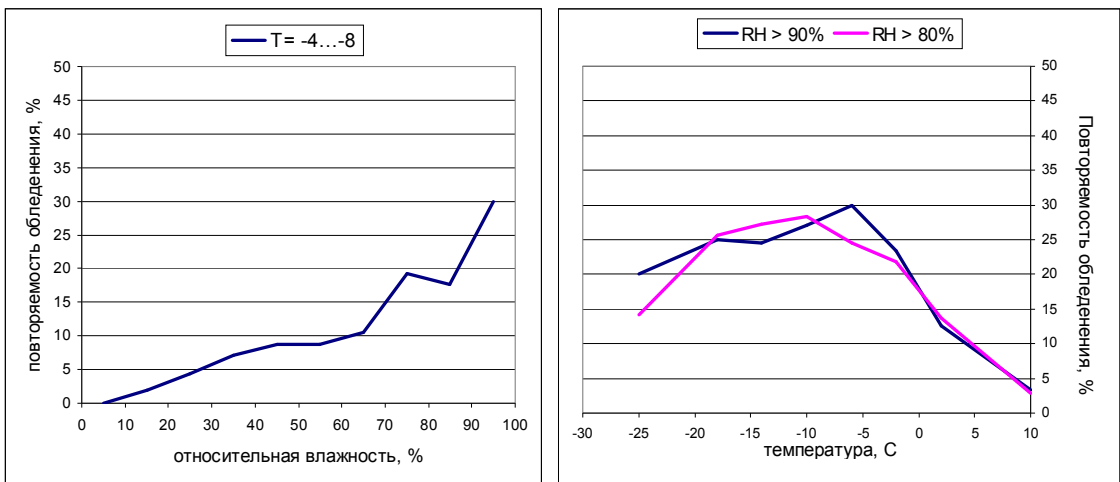


Рис. 4. То же, что на рис. 2, но на уровне 700 гПа.

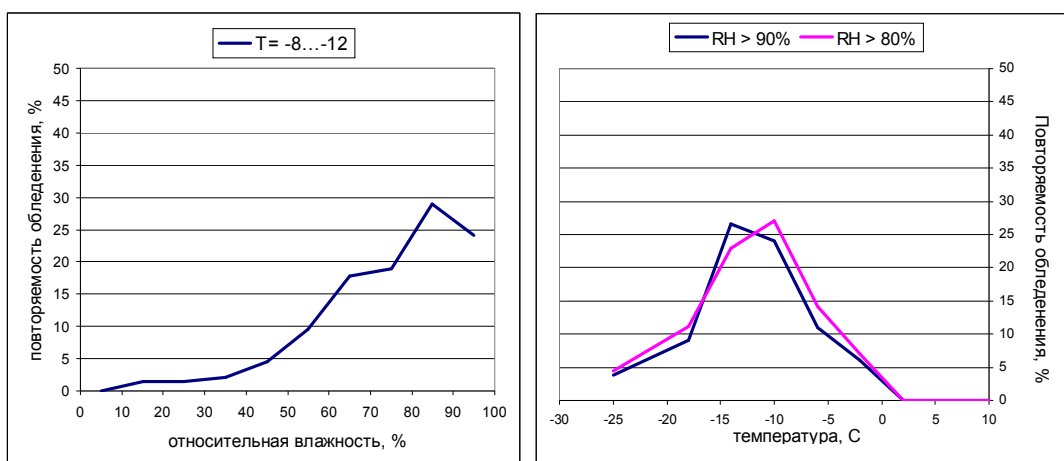


Рис. 5. То же, что на рис. 2, но на уровне 500 гПа.

2. Хотя обледенение ВС может наблюдаться в широком интервале отрицательных температур, его вероятность максимальна в сравнительно узких интервалах температуры и относительной влажности ($-5...-10$ °C и >85 % соответственно). Вне этих интервалов вероятность обледенения быстро понижается. При этом зависимость от относительной влажности представляется более сильной, а именно, при $R_H > 70$ % наблюдалось 90,6 % всех случаев обледенения. Эти выводы получены на выборке данных самолетного зондирования; они находят полное качественное подтверждение на данных TAMDAR–OA. Факт хорошего согласия результатов анализа двух выборок данных, полученных различными методами в сильно различающихся географических условиях и в разные периоды времени, показывает репрезентативность обеих используемых выборок для характеристики физических условий обледенения самолетов.

На основании результатов выполненного тестирования различных алгоритмов для расчета зон обледенения и с учетом имеющихся данных о зависимости интенсивности обледенения от температуры воздуха, выбран и рекомендован к практическому использованию наиболее надежный алгоритм, ранее хорошо зарекомендовавший себя в международной практике (алгоритм, разработанный в NCEP). Он оказался наиболее успешным (значения критерия качества Пирси-Обухова составили 0,54 на выборке данных самолетного зондирования и 0,42 на выборке данных TAMDAR–OA). В соответствии с этим алгоритмом, прогноз зон возможного обледенения самолетов представляет собой диагноз указанных зон по прогностическим полям температуры (T , °C) и относительной влажности (R_H , %) на изобарических поверхностях 500, 700, 850, 925 (900) гПа в узлах модельной сетки.

Узлами сетки, принадлежащими к зоне возможного обледенения самолетов, считаются узлы, в которых выполняются следующие условия:

$$-16\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 0\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{и} \quad R_H \geq 63\text{ \%}. \quad (1)$$

Неравенства (1) получены в NCEP в рамках программы RAP (Research Application Programme) [14] на большой выборке данных измерений с помощью самолетных датчиков обледенения, температуры, влажности воздуха и применяются на практике для расчетов прогностических карт особых явлений для авиации. Показано, что повторяемость обледенения самолетов в зонах выполнения неравенств (1) на порядок выше, чем вне этих зон.

Программа оперативных испытаний метода прогноза зон возможного обледенения самолетов с использованием (1) имеет определенные особенности, отличающие ее от стандартных программ испытаний новых и усовершенствованных методов прогноза. Прежде всего, алгоритм не является оригинальной разработкой ГУ «Гидрометцентр России». Он в достаточной степени проверен и оценен на разных выборках данных [14].

Далее, успешность разделения случаев наличия и отсутствия обледенения ВС не может являться в данном случае объектом оперативных испытаний, ввиду невозможности получения оперативных данных об обледенении ВС. Единичные, нерегулярные рапорты пилотов, поступающие в МЦ АУВД, не могут в обозримое время составить репрезентативную выборку данных. Объективные данные типа TAMDAR над территорией России отсутствуют. Невозможно получить такие данные и над территорией США.

Однако, учитывая, что решающее правило (1) получено на большом архиве данных и внедрено в практику NCEP, причем его успешность многократно подтверждена на независимых данных (в том числе и в рамках темы 1.4.1 на выборках СЗ и TAMDAR–ОА), можно полагать, что в диагностическом плане статистическая связь между вероятностью обледенения и выполнением условий (1) является достаточно тесной и достаточно надежно оценена для практического применения.

Остается невыясненным вопрос о том, насколько правильно воспроизводятся в численном прогнозе зоны выполнения условий (1), выделенные по данным объективного анализа.

Иначе говоря, объектом испытаний должен являться численный прогноз зон, в которых выполняются условия (1). То есть, если в диагностическом плане решающее правило (1) является эффективным, то необходимо оценить успешность прогноза этого правила численными моделями.

Авторские испытания в рамках темы 1.4.1 показали, что модель ПЛАВ достаточно успешно прогнозирует зоны возможного обледенения ВС, определяемые через условия (1), однако уступает в этом отношении модели NCER [3, 8]. Поскольку в настоящее время оперативные данные модели NCER поступают в ГУ «Гидрометцентр России» достаточно рано, можно полагать, что, при условии значительного перевеса в точности прогноза, целесообразно использовать эти данные для расчета карт ОЯ. Поэтому было сочтено целесообразным выполнить оценку успешности прогноза зон выполнения условий (1) как по модели ПЛАВ, так и по модели NCER. В принципе следовало бы включить в программу и спектральную модель T169L31. Однако серьезные недостатки прогноза поля влажности не позволяют пока считать эту модель перспективной для прогноза обледенения.

В базу данных записывались поля результатов расчетов на каждой из четырех указанных изобарических поверхностей в дихотомических переменных: 0 означает невыполнение условий (1), 1 – выполнение. Параллельно рассчитывались аналогичные поля по данным объективного анализа. Для оценки точности прогноза необходимо сравнить результаты расчета (1) в узлах сетки по прогностическим полям и по полям объективного анализа на каждой изобарической поверхности.

В качестве фактических данных о зонах возможного обледенения ВС использовались результаты расчетов соотношений (1) по данным объективного анализа. Применительно к модели ПЛАВ это результаты расчетов (1) в узлах сетки с шагом 1,25 град, применительно к модели NCER – в узлах сетки с шагом 1 град; в обоих случаях расчет производится на изобарических поверхностях 500, 700, 850, 925 гПа.

Прогнозы оценивались в рамках технологии оценки для дихотомических переменных. Оценки выполнялись и анализировались в Лаборатории испытаний и оценки методов прогнозов ГУ «Гидрометцентр России».

Для определения успешности прогнозов зон возможного обледенения самолетов рассчитывались следующие характеристики: оправдываемость прогнозов наличия явления, отсутствия явления, общая оправдываемость, предупрежденность наличия и отсутствия явления, критерий качества Пирси–Обухова и критерий надежности Хайдке–Багрова. Оценки выполнялись для каждой изобарической поверхности (500, 700, 850, 925 гПа) и отдельно для прогнозов, стартующих в 00 и 12 ч ВСВ. Результаты испытаний представлены в таблице для трех областей прогноза – Северного полушария, России и ее европейской территории (ЕТР) при заблаговременности прогноза 24 ч.

Из таблицы видно, что повторяемость обледенения по объективному анализу обеих моделей близка, причем она максимальна на поверхности 700 гПа, минимальна на поверхности 400 гПа. При расчете по полушарию на втором месте по повторяемости

обледенения стоит поверхность 500 гПа, затем – 700 гПа, что, очевидно, объясняется большим вкладом глубокой конвекции в тропиках. При расчете по России и ЕТР на втором месте по повторяемости обледенения находится поверхность 850 гПа, а на поверхности 500 гПа повторяемость обледенения уже вдвое меньше. Все характеристики оправдываемости прогнозов оказались высокими. Хотя показатели успешности модели ПЛАВ несколько уступают модели NCER, однако и они вполне практически значимы. На уровнях, где повторяемость обледенения высока и где оно представляет наибольшую опасность для ВС, показатели успешности следует признать очень высокими. Они заметно снижаются на поверхности 400 гПа, особенно в случае модели ПЛАВ, оставаясь значимыми (критерий Пирси по Северному полушарию понижается до 0,493, по России – до 0,563). По ЕТР результаты испытаний на уровне 400 гПа не приводятся ввиду того, что случаев наличия обледенения на этом уровне было крайне мало (37 узлов сетки модели NCER за весь период), и результат оценки успешности прогноза статистически незначим. На остальных уровнях атмосферы результаты, полученные по ЕТР и России, очень близки.

Таким образом, оперативные испытания показали, что разработанный метод прогноза зон возможного обледенения ВС, реализующий алгоритм NCER, обеспечивает достаточно высокую успешность прогноза, в том числе на выходных данных глобальной модели ПЛАВ, которая в настоящее время является основной прогностической моделью. Решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета от 1 декабря 2009 года метод рекомендован к внедрению в оперативную практику Лаборатории зональных прогнозов ГУ «Гидрометцентр России» для построения карт особых явлений для авиации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов А.М., Мазурин Н.И., Солонин С.В., Янковский И.А. Авиационная метеорология. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 281 с.
2. Зверев Ф.С. Синоптическая метеорология. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 711 с.
3. Иванова А.Р. Опыт верификации численных прогнозов влажности и оценка их пригодности для прогноза зон обледенения воздушных судов // Метеорология и гидрология. – 2009. – № 6. – С. 33–46 .
4. Отчет о НИР: 1.1.1.7: Совершенствование методов и технологий прогнозов по аэродрому и на воздушных трассах (заключительный). № гос. регистрации 01.02.007 06153. – М., 2007. – 97 с.

5. Отчет о НИР 1.1.1.2: Разработка проекта технологии подготовки прогностической карты особых явлений погоды для полетов авиации на нижних уровнях (заключительный). № гос. Регистрации 01.2.007 06153. – М., 2007. – 112 с.
6. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации / Абрамович К.Г., Васильев А.А. (ред.). – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 301 с.
7. Технический Регламент ВМО-№49. Том 2. Метеорологическое обслуживание международной аэронавигации. – 2004.
8. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р., Горлач И.А. Оценка механизмов генерации вертикальных движений в глобальных моделях и их начальных полях в связи с численным прогнозом осадков // Метеорология и гидрология. – 2009. – № 7. – С. 14–32.
9. Bernstein B.C., McDonough F., Politovich M.K., Brown B.G., Ratvasky T.P., Miller D.R., Wolff C.A., Cuning G. Current icing potential: algorithm description and comparison with aircraft observations // J. Appl. Meteorol. – 2005. – V. 44. – P. 969–986:
10. Le Bot C. SIGMA: System of icing geographic identification in meteorology for aviation // 11th Conf. on Aviation, Range, and aerospace, Hyannis, Mass., 4–8 Oct. 2004. – Amer. Meteorol. Soc. (Boston). – 2004.
11. Menzel W.P., Frei R.A., Zhang H., et al. MODIS global cloud-top pressure and amount estimation: algorithm description and results // Weather and Forecasting. – 2008. – V. 2. – P. 1175–1198.
12. Minnis P., Smith W.L., Young D.F., Nguyen L., Rapp A.D., Heck P.W., Sun-Mack S., Trepte Q., Chen Y. A near real-time method for deriving cloud and radiation properties from satellites for weather and climate studies // Proc. AMS 11th Conf. Satellite Meteorology and Oceanography, Madison, WI, 15-18 Oct. – 2001. – P. 477–480.
13. Otkin J. A., Greenwald T. J. Comparisons of WRF model-simulated and MODIS-derived cloud data. Mon. Weather Rev. – 2008. – V. 136. – N. 6. – P. 1957–1970.
14. Thompson G., Bruintjes R.T., Brown B.G., Hage F. Intercomparison of in-flight icing algorithms. Part 1. WISP94 real-time icing prediction and evaluation program // Weather and Forecasting. – 1997. – V. 12. – P. 848–889.

Таблица

**Характеристики успешности прогнозов зон возможного обледенения самолетов на 24 ч по моделям ПЛАВ и NCEP
на изобарических поверхностях 850, 700, 500 и 400 гПа**

Уровни, гПа	Повторяемость по анализу		Общая оправдываемость прогнозов		Оправдываемость				Предупрежденность				Критерий			
					наличия обледенения		отсутствия обледенения		наличия обледенения		отсутствия обледенения		Пирси - Обухова		Хайдке-Багрова	
	ГМЦ	NCEP	ПЛАВ	NCEP	ПЛАВ	NCEP	ПЛАВ	NCEP	ПЛАВ	NCEP	ПЛАВ	NCEP	ПЛАВ	NCEP	ПЛАВ	NCEP
Северное полушарие (7721502 узлов сетки модели ПЛАВ, 11859120 узлов сетки модели NCEP)																
850	17,7	17,8	92,8	96,3	79,2	88,5	95,8	98,0	80,2	91,0	95,5	97,4	0,758	0,884	0,754	0,874
700	21,4	21,4	89,6	93,2	75,9	85,6	93,3	95,2	75,2	82,2	93,5	96,2	0,687	0,784	0,689	0,796
500	18,8	17,8	88,0	91,9	68,9	79,0	92,3	94,4	66,5	74,0	93,0	95,7	0,596	0,698	0,604	0,716
400	8,4	6,7	93,7	96,2	65,6	73,5	95,7	97,7	51,7	67,6	97,5	98,3	0,493	0,659	0,545	0,684
Россия (1702998 узлов сетки модели ПЛАВ, 2612192 узла сетки модели NCEP)																
850	20,3	20,7	91,3	95,2	79,7	87,8	94,2	97,2	76,9	89,3	95,0	96,8	0,719	0,861	0,729	0,855
700	32,7	32,5	84,6	89,7	78,1	86,9	87,5	91,0	73,5	80,5	90,0	94,2	0,635	0,747	0,644	0,761
500	10,6	13,2	90,4	93,2	53,7	75,3	95,6	95,8	63,8	72,6	93,5	96,4	0,573	0,690	0,530	0,701
400	0,9	1,4	99,1	99,2	50,6	73,1	99,6	99,6	56,8	73,7	99,5	99,6	0,563	0,733	0,531	0,730
ЕТР (398574 узла сетки модели ПЛАВ, 608522 узла сетки модели NCEP)																
850	18,1	18,2	92,2	95,6	80,0	88,0	94,7	97,3	75,8	88,0	95,8	97,3	0,716	0,853	0,731	0,853
700	31,3	32,6	84,2	88,9	76,5	87,0	87,4	89,7	71,5	77,7	90,0	94,4	0,615	0,720	0,626	0,741
500	7,4	9,7	91,4	93,7	43,0	68,1	95,9	96,2	49,7	64,8	94,7	96,7	0,444	0,615	0,414	0,629