

ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАКОВ НИЖНЕГО ЯРУСА НА АЭРОДРОМАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ БЫВШЕГО СССР ПО ДАННЫМ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ

Н.П. Шакина, Е. Н. Скриптунова, А.Р. Иванова, Е.И. Ветрова

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
chakina@mecom.ru, skript@mecom.ru, ivanova@mecom.ru*

Введение

Среди погодных явлений, оказывающих наибольшее влияние на регулярность и безопасность полетов воздушных судов, одно из первых мест занимает низкая облачность и связанная с ней, а также с осадками и туманами, ухудшенная видимость. По оценкам специалистов [15, 16], правильный своевременный прогноз указанных характеристик погоды позволил бы снизить на 20–35 % число метеорологически обусловленных нарушений графика полетов, что в масштабе США дало бы экономию \$500–875 млн в год.

Основным методом прогноза погоды на аэродромах, в том числе прогноза низкой облачности, в настоящее время является статистическая интерпретация продукции численных моделей [9, 20], т. е. использование статистических зависимостей между величинами, достаточно точно предвычисляемыми в рамках моделей, и характеристиками погоды, не прогнозируемыми в моделях или прогнозируемыми с недостаточной точностью. При разработке таких зависимостей широко используются наземные наблюдения, в особенности наблюдения на аэродромах, имеющие к тому же более высокое временное разрешение, чем продукция численных моделей, которая обычно доступна с дискретностью 6 (а часто и 12) часов. Статистический постпроцессинг является основным инструментом как краткосрочного, так и сверхкраткосрочного прогнозирования и наукастинга. Мировой опыт работ в этом направлении использован авторами при решении задачи автоматизированного краткосрочного прогноза высоты нижней границы облаков (ВНГО) на крупных аэродромах европейской России и сопредельных государств. В качестве реальных данных в работе использованы наблюдения на аэродромах, а в качестве модельных данных – выходная продукция моделей, оперативно используемых в Гидрометцентре России, прежде всего мезомасштабной модели COSMO-RU07.

Состояние вопроса

Отечественные работы в направлении прогноза ВНГО немногочисленны. В [1, 2, 6] описаны качественные синоптические признаки, использовавшиеся для прогноза наличия, а не высоты облаков, и рекомендовано развивать регрессионные уравнения для конкретных аэродромов с использованием характеристик поля влажности в качестве предикторов. Более полезными для наших целей представляются результаты работ, посвященных поиску количественных, физически обоснованных диагностических связей между ВНГО и наземными значениями метеорологических величин. К таким работам относятся [3–5, 7, 8]; из них наибольший практический интерес представляет статья Е.С. Селезневой [7], в которой полученная в свое время Феррелем простейшая зависимость между ВНГО и дефицитом точки росы (в предположении адиабатического подъема частицы под действием турбулентности до уровня конденсации) представлена в полуэмпирическом виде на основе большого объема аэрологических данных. В [4] был определен равновесный вертикальный градиент температуры в турбулентном потоке при квазистатических условиях, который и был использован в [7]. Позже появились работы [3, 8], в которых дополнительно включался в рассмотрение упорядоченный подъем воздуха. К сожалению, эти работы трудно использовать на практике, в частности и потому, что они не охватывают всего разнообразия условий термической стратификации, при которой существует низкая облачность. В [5] впервые предложен способ расчета ВНГО по данным численного прогноза, в то время еще весьма несовершенного. Этот первый опыт постпроцессинга, очень сложный технически, продемонстрировал весьма скромный уровень согласия с радарными и шаропилотными измерениями в приближении идеального прогноза и дальнейшего развития в то время не получил.

В ряде современных численных прогностических моделей наличие и количество низкой облачности, а иногда и ВНГО входят в список выходной продукции. Однако точность таких прогнозов не удовлетворяет требованиям авиации: согласно мнению некоторых американских метеорологов [10], краткосрочные модельные прогнозы ВНГО еще в 70-е годы XX века были хуже инерционных. Поэтому большие усилия постоянно направляются на получение более точного прогноза ВНГО, как правило, сверхкраткосрочного прогноза или наукастинга. Модели, продукция которых оперативно доступна в Гидрометцентре России, не содержат ВНГО в списках своей продукции.

Можно выделить три направления разработок проблемы прогноза ВНГО: (1) статистические методы прогноза на основе наземных измерений на одной станции или на группе станций [10, 12–16, 21]; (2) методы MOS для конкретных моделей [11, 14, 17, 19, 20];

и (3) усовершенствование численного прогноза, включая применение метода ансамблевого прогнозирования [17, 18]. Для целей настоящего исследования наибольший интерес представляют работы второго из перечисленных направлений. Они достаточно многочисленны; в число используемых предикторов авторы этих работ включают результаты численных прогнозов, наблюдения на станциях и некоторые другие величины (например характеристики климата). Наиболее крупным достижением в этом направлении считается разработка системы LAMP (Localized Aviation MOS Program) [19], сменившая использовавшиеся ранее программы RUC-20 (20-km Rapid Update Cycle Model) модели WRF-NMM и SREF (Short-Range Ensemble Forecast System). Программа генерирует как категорические, так и вероятностные прогнозы не только ВНГО, но и других особых явлений для авиации: видимости, осадков (факт и тип), гроз для 1591 станции в пределах США с заблаговременностями от 1 до 25 ч на основе систем уравнений регрессии. В число предикторов входят, кроме данных глобальной модели GFS и наблюдений на станциях, также климатические характеристики и адвективные значения некоторых величин.

В целом, мировой опыт указывает на целесообразность использования для прогноза ВНГО как локальных данных наблюдений, так и модельных величин. Применяемые в мировой практике методы преимущественно основаны на статистической обработке рядов данных о предикторах и предиктантах с использованием регрессионного, реже дискриминантного анализа и пороговых значений. При этом, судя по опубликованным результатам [15], улучшение точности прогноза на 1,5 % уже представляется практически значимым.

В условиях Гидрометцентра России следует считать модель COSMO-RU07 наиболее близко соответствующей требованиям метеообеспечения авиации, в сравнении с другими оперативными моделями. Глобальная модель ПЛАВ обладает рядом достоинств, однако ее горизонтальное разрешение, даже в версии с сеткой $0,26^{\circ} \times 0,56^{\circ}$, значительно хуже, чем в модели COSMO-RU07. Все же в данной работе архивировались и использовались данные и этой модели, а также модели NCEP (США) с шагом географической сетки 1° .

Использованные данные

В качестве реальных данных о наличии низкой облачности и высоте ее нижней границы использованы данные аэродромных наблюдений, сообщаемые в Гидрометцентр России в виде телеграмм в коде METAR. В Отделе авиационной метеорологии производится их декодирование и формируется база данных, пригодная для компьютерной обработки. База включает наблюдения на 45 аэродромах в европейской части бывшего СССР с дискретностью 30 мин (иногда 1 ч) за период с января 2001 года до настоящего времени

(база пополняется в оперативном режиме). В статье использованы данные за период 2001–2010 гг., сгруппированные по градациям количества низкой облачности в октантах: 0–3 окт (безоблачно или малооблачно), ≥ 3 окт, ≥ 5 окт и 8 окт. (В качестве низкой облачности в телеграммах METAR представлена неконвективная облачность с нижней границей не выше 1500 м без указания формы облаков.) Как известно [20], ВНГО для авиации прогнозируется при покрытии небосвода низкими облаками больше, чем наполовину. Таким образом, для градации 0–3 окт ВНГО определяться не будет. Наибольший интерес для авиации представляют градации ≥ 5 и 8 окт, особенно первая из них, объединяющая словесные категории количества облаков «broken» и «overcast».

Кроме данных METAR к используемым реальным данным относится архив оперативного объективного анализа Гидрометцентра с разрешением $2,5^\circ$ (до 2005 г.) и $1,25^\circ$ (с 2005 г.); из этого архива использовались поля температуры и влажности у земли и на поверхностях 1000, 925, 850, 700 гПа, геопотенциальных высот перечисленных поверхностей, а также приземного давления за сроки 0 и 12 ч ВСВ.

Использованы также архивы выходных данных модели COSMO-RU07 (мезомасштабная модель с шагом 7 км) за период с апреля 2010 до июля 2012 года, а также глобальных моделей ПЛАВ (полулагранжева модель с шагами $0,9$ и $0,72^\circ$ по широтному кругу и меридиану соответственно) с октября 2010 по октябрь 2011 г. и NCEP с шагом 1° с января 2009 по сентябрь 2011 г. с заблаговременностью 24 ч в сроки 0 и 12 ч ВСВ. Вместе с прогностическими полями моделей архивировались их начальные поля.

Изменчивость ВНГО и точность прогноза

Как известно, измеренная ВНГО варьирует во времени и в пространстве. Для правильного понимания возможностей прогнозирования важно иметь представление о характеристиках изменчивости предиктанта, если не в пространстве (для таких оценок мы не располагаем данными), то во времени. Оценки изменчивости ВНГО были сделаны за период 2001–2010 гг. по каждому аэродрому и по всей их совокупности, а также по интервалам ВНГО отдельно для трех ситуаций: (1) облачность с ВНГО не выше 1500 м существовала в оба сопоставляемых срока; (2) кроме случаев существования облачности с ВНГО ≤ 1500 м в оба срока включались случаи появления облачности при ее отсутствии в исходный срок или исчезновения при наличии в исходный срок (такие случаи составляли от 1,7 до 4,8 % всей выборки при облачности 8 окт для интервалов 0,5 и 2 ч между наблюдениями соответственно), (3) то же для подвыборки ВНГО ≤ 300 м хотя бы в один из сопоставляемых сроков. Не приводя таблиц результатов за недостатком места, укажем лишь основные выводы. Так, в ситуации (1) при количестве облаков ≥ 5 и 8 окт получаем, что примерно в

половине случаев ВНГО изменяется более чем на 50 м за 2 ч. В ситуации (2) – более чем в 55 % случаев изменения ВНГО в пределах первых двух часов превосходят 100 м. Наконец, в ситуации (3) при облачности 8 окт изменения ВНГО более чем на 50 м за 0,5 и 2 ч наступают в 20 и 62 % случаев соответственно, а более чем на 100 м – в 8 и 40 % случаев. Изменения ВНГО в общем больше при количестве облачности ≥ 5 окт, чем при 8 окт.

С точки зрения правильной интерпретации краткосрочных прогнозов ВНГО, имеет смысл рассмотреть также продолжительность эпизодов наличия низкой облачности. Такие оценки были сделаны на выборке данных METAR за 2001–2010 гг. Будем считать эпизодом явление непрерывной регистрации облачности в определенной градации количества облаков в течение определенного числа сроков. Допускалось в пределах эпизода отсутствие данных за один срок. Так, если в 11.00 ч ВСВ регистрировалась низкая облачность в количестве ≥ 5 окт, в 11.30 телеграмма отсутствовала, а в 12.00 снова регистрировалась такая же облачность, то считалось, что она наблюдалась и в 11.30, и эти данные относились к одному эпизоду. Если же, например, в течение ряда сроков наблюдалась низкая облачность ≥ 5 окт (в 8.00, 8.30, ... , 11.00), а затем в один из сроков (11.30) зарегистрирована облачность 1–4 окт либо CAVOK, и вслед за этим (в 12.00) снова ≥ 5 окт, то считалось, что в 11.00 закончился один эпизод существования облачности ≥ 5 окт, а в 12.00 начался следующий.

В табл. 1 приведены среднегодовые данные о распределении (в процентах) эпизодов наличия облачности 8 окт по их длительности. По этим данным можно оценить, например, процент эпизодов продолжительностью более 6 ч: он варьирует от 5,6 % (Мурманск) и 6,2 % (Анапа) до 44,0 % (Кривой Рог) и 37,5 % (Саратов), в среднем составляя 22,4 %. Таким образом, в среднем только каждый пятый эпизод наличия полной облачности продолжается 6 ч и более. Добавим, что аналогичный расчет продолжительности эпизодов низкой облачности в количестве ≥ 3 окт дает среднее значение процента эпизодов продолжительностью более 6 ч, равное 22,8 %.

На всех аэродромах длительные эпизоды низкой облачности наиболее характерны для зимы, затем – для осени. Летом, как правило, эпизоды наличия низкой облачности кратковременны и немногочисленны. Минимальное количество эпизодов за месяц отмечено в Волгограде (в августе – 3 эпизода продолжительностью не более 3 ч) и Ставрополе. На аэродромах с низкой повторяемостью (Сочи, Мурманск) преобладают эпизоды длительностью не более одного часа. То же относится к аэродромам Внуково и Домодедово. На аэродромах с высокой повторяемостью в целом выше и процент продолжительных эпизодов, хотя эта последняя характеристика и не очень показательна, ввиду большой разницы в числе эпизодов на разных аэродромах. Максимальная продолжительность эпизодов составляет несколько суток, различаясь на различных аэродромах и при различных

количествах облаков. Так, на аэродроме Внуково максимальная продолжительность эпизодов наличия облачности ≥ 5 и 8 окт составляет 238,5 и 177,0 ч соответственно, а самый длинный эпизод наличия облачности 8 окт наблюдался в Нижнем Новгороде и продолжался 237 ч.

Изменчивость ВНГО можно также количественно оценить, рассмотрев автокорреляционные функции этой величины для конкретных аэродромов. Расчет автокорреляционных функций ВНГО проводился в следующих вариантах: 1) «реалистический» вариант: если как в исходном, так и в сдвинутом рядах низкой облачности не наблюдалось, то такая пара значений исключалась из рассмотрения; если же в одном из рядов низкая облачность наблюдалась, а в другом – нет, то отсутствовавшее значение ВНГО заменялось константой, превышающей реальные значения этой величины (например, 2500); 2) «нереалистический» вариант: если хотя бы одно значение ВНГО в паре, состоящей из членов исходного и сдвинутого рядов, соответствовало отсутствию низкой облачности, то эта пара браковалась; иначе говоря, автокорреляционная функция рассчитывалась для нереалистических условий постоянного существования низкой облачности.

Результаты для основных московских аэропортов представлены на рисунке. Видно, что в реалистическом варианте инерция ВНГО невелика: уже через 2 ч связь с исходным значением сильно ослаблена, а через 6 ч практически отсутствует вследствие конечной продолжительности эпизодов низкой облачности. Действительно, если бы разрывов между эпизодами не было (нереалистический вариант, кривая 2 на рисунке), то «связность» значений ВНГО существовала бы вплоть до 6 ч. Иначе говоря, если бы низкая облачность сохранялась длительное время, то прогноз высоты ее нижней границы, данный на конкретный момент, можно было бы уверенно распространять на период до 6 ч. Однако, как показано выше, такие длительные эпизоды существования низкой облачности имеют место в среднем лишь в 20–25 % случаев.

Такие оценки подчеркивают важность наукастинга и сверхкраткосрочного прогноза ВНГО и показывают также, что краткосрочный (на 24 ч) прогноз ВНГО может быть только ориентировочным и что, по-видимому, нет смысла прогнозировать ВНГО за сутки с точностью до десятков или даже сотни метров. Действительно, краткосрочный прогноз, даваемый с интервалом 6 ч, действителен в течение ± 3 ч от своего срока, а даваемый с интервалом 12 ч, т. е. в 0 и 12 ч ВСВ, в течение ± 6 ч. При этом характерное время важных для авиации изменений ВНГО, как показано выше, составляет около 2 ч. Это значит, что такие практически значимые изменения могут улавливаться прогнозами, период действия которых сравним с указанным характерным временем. Этому требованию удовлетворяют сверхкраткосрочные прогнозы и наукастинг.

На основании всего сказанного в данном разделе было принято решение о формулировке краткосрочного (на 24 ч) прогноза ВНГО в виде «ВНГО \leq 300 м» либо «1500 м \geq ВНГО $>$ 300 м», так что первая из градаций включает весь диапазон ВНГО, значительно влияющий на условия взлета и посадки воздушных судов, тогда как вторая градация практически безопасна. Такая формулировка предиктанта представляется наиболее методически обоснованной и пригодной для практического использования.

Вместе с тем представляет интерес возможность предсказания наиболее неблагоприятных условий, соответствующих ВНГО \leq 100 м в срок прогноза. Наличие или отсутствие такой градации также будет рассматриваться как вариант предиктанта.

Распределение ВНГО на аэродромах по высотам в пределах нижних 1500 м

Распределение различных высот облаков при их количестве 8 окт по интервалам за год представлено в табл. 2. Доли случаев даны в процентах от общего числа случаев облачности с ВНГО \leq 1500 м. Из анализа таблицы видно, что имеется группа аэродромов, на которых наибольшую повторяемость имеют облака с нижней границей \leq 90 м, и другая группа с наибольшей повторяемостью ВНГО в пределах от 150 до 300 м. К первой группе относятся 16 аэродромов, из которых наиболее сильно выражен максимум повторяемости ВНГО \leq 90 м в Салехарде (83,5 %), Запорожье (51,6 %), Ставрополе (49,7 %), Нальчике (43,2 %), Волгограде (41,2 %); ко второй – около 20 аэродромов, в частности Внуково (45,7 %), Самара (44,2 %), Шереметьево (42,9 %), Воронеж (36,3 %), С.-Петербург (32,8 %), Одесса (32,4 %), Домодедово (31,7 %). Наконец, на некоторых аэродромах повторяемость ВНГО в этих двух интервалах почти одинакова (Мурманск, Ханты-Мансийск, Ростов-на-Дону, Минеральные Воды, Киев, Кишинев, Краснодар). Исключение составляют Уфа, Сочи и Махачкала, в которых слабые максимумы повторяемости ВНГО относятся, соответственно, к диапазонам 600-1000, 1000-1500 и 600-1000 м.

Годовой ход ВНГО (таблица не приводится) характеризуется некоторым увеличением доли самых низких облаков в зимний сезон, который в целом мало отличается по распределению ВНГО от среднегодовых показателей. В частности в Уфе отличие зимнего распределения от среднегодового заключается в том, что максимум повторяемости смещается к слою 300–400 м. В летний же сезон отмечается почти повсеместное смещение максимумов повторяемости к более высоким уровням. Так, ВНГО \leq 90 м остается преобладающим только в Домодедове и Ставрополе, а на таких аэродромах как Саратов, Краснодар, Минеральные Воды преобладающим диапазоном ВНГО становится слой 1000–1500 м. При этом число случаев низкой облачности в летний сезон повсюду намного меньше, чем зимой.

Расчет ВНГО по синхронным данным одного пункта

Как показывает опыт [1, 7] и наши собственные оценки, наиболее информативным предиктором ВНГО (как и наличия низкой облачности) является относительная влажность. В рамках идеального прогноза это означает, что по наблюдаемой относительной влажности (или дефициту точки росы) можно с достаточной точностью оценить высоту нижней границы низких облаков. Действительно, известная формула Е.С. Селезневой [7] выражает именно эту зависимость:

$$\text{ВНГО} = 208 (T - \tau), \quad (1)$$

где T – температура; τ – точка росы; ВНГО выражена в метрах.

Оценки показывают, что формула (1) лучше работает при ВНГО < 500 м; но именно малые ВНГО представляют наибольший интерес с точки зрения метеорологического обеспечения авиации. Очевидно, из (1) следует, что ВНГО < 100 м получается при $T - \tau < 0,5$ °С. Применение (1) к данным телеграмм METAR может приводить в каких-то случаях к грубым ошибкам, поскольку в этих телеграммах температура и точка росы даются с точностью до целых градусов, и $T - \tau = 0$ по данным телеграмм может получаться и в тех случаях, когда по дневникам погоды, где данные о T и τ приводятся с точностью до 0,1 °С, эта разность может принимать любые значения от 0 до 1 °С. Желая определить пригодность (1) к расчету ВНГО на конкретном аэродроме, необходимо пользоваться данными дневников погоды, а не телеграмм METAR. Мы, к сожалению, располагаем данными дневников погоды только для аэродромов Московского аэроузла (Внуково, Домодедово, Шереметьево) за 1996–2005 гг. Расчеты по этим данным с использованием (1) и сравнение полученных расчетных значений с наблюдаемыми ВНГО дали следующие результаты (табл. 3).

Прежде всего заключаем, что формула (1) дает практически значимые результаты для ВНГО ≤ 300 м на всех трех аэродромах (хотя показатели для Домодедова ниже, чем для двух других аэродромов), а для ВНГО ≤ 100 м – только на аэродромах Внуково и Шереметьево. Хотя повторяемость ВНГО ≤ 100 м на всех трех аэродромах низка, тем не менее оправдываемость прогноза (в данном случае диагноза) наличия явления в Шереметьеве и Внукове в 10–20 раз превосходит его повторяемость, что, при высокой предупреденности, обеспечивает значения критерия Пирси выше 0,6, в отличие от Домодедова, где формула (1) оказывается неприменимой к прогнозу ВНГО в этом диапазоне даже при задании предиктора в соответствии с реальным значением, зафиксированным в дневнике погоды. Подчеркнем, что табл. 3 получена по данным за период (1996–2005 гг.), отличный от того, для которого имеются данные телеграмм METAR (2001–2010 гг.).

С учетом сказанного применим теперь (1) непосредственно к данным телеграмм METAR (табл. 4). Приведенные в таблице результаты получены следующим образом. Если расчетная ВНГО оказывалась ниже 100 (или 300) метров и реально наблюдавшаяся ВНГО лежала в том же интервале, то расчет считался правильным («прогноз в рамках концепции РР оправдался»). Если же расчетная и наблюдаемая ВНГО оказывались в разных интервалах высот, то расчет считался неудачным («прогноз не оправдался»). Расчет производился по всей выборке случаев, для которой была известна повторяемость ВНГО в соответствующем интервале. Коэффициенты корреляции между наблюдаемыми ВНГО и дефицитом точки росы в таблице даны на уровне значимости $\alpha = 0,05$. Ошибки расчета определены по подвыборке случаев, когда наблюдаемая ВНГО была ниже 300 м.

Оказалось, что, несмотря на указанные выше источники ошибок в целом в двух представляющих наибольший практический интерес интервалах ВНГО формула дает практически значимые результаты. При этом для двух московских аэродромов (Внуково и Шереметьево) они качественно согласуются с табл. 3, а результат для Домодедова получился значительно более высоким, чем в табл. 3. Систематические (арифметические) ошибки чаще всего положительны: расчетные ВНГО в среднем выше наблюдаемых.

Таким образом, даже грубые измерения T и τ в общем пригодны для оценки ВНГО в ограниченном «бинарном» смысле попадания или непопадания в градации ≤ 100 и ≤ 300 м. При ВНГО > 300 м ошибки расчета быстро увеличиваются с ростом ВНГО, и использование формулы (1) становится нецелесообразным. В этом интервале высот облаков более целесообразно пользоваться уравнениями регрессии, которые и были получены для каждого аэродрома. В качестве предикторов кроме дефицита точки росы использовалась также температура, которая в среднем и на большинстве аэродромов слабо коррелирует с ВНГО, но на отдельных аэродромах ее учет вносит существенные уточнения. Так, коэффициенты корреляции ВНГО и температуры на 5 %-ном уровне значимости достигают 0,52, 0,51 и 0,50 по данным наблюдений в Харькове, Минеральных Водах и Бресте соответственно.

Приведенные результаты расчетов ВНГО по данным синхронных измерений на аэродромах являются чисто диагностическими (т. е. полученными в предположении идеального прогноза). Заменяя наблюдаемые значения синхронных предикторов – температуры и точки росы – их предсказанными значениями, мы включаем в рассмотрение конкретную численную модель с присущими ей ошибками прогноза температуры и влажности.

Расчет ВНГО по выходным данным численных моделей

Как указано выше, численные прогностические модели, продукцию которых целесообразно использовать для прогноза ВНГО на аэродромах европейской части бывшего СССР, – это прежде всего оперативная мезомасштабная модель COSMO-RU07, а также глобальная оперативная полулагранжева модель ПЛАВ. Их выходная продукция (прогнозы на 12 и 24 ч) архивировалась в Отделе авиационной метеорологии с июля и апреля 2010 г., соответственно с тем, чтобы получить возможность расчета ВНГО по данным в ближайшем к каждому аэродрому узле модельной сетки и затем сравнить полученные таким образом прогностические значения ВНГО с наблюдаемыми в срок прогноза на аэродроме по возможно большей выборке.

На первом этапе работы по прогностическим (с заблаговременностью 24 ч) температуре и влажности либо на высоте 2 м над подстилающей поверхностью, либо на поверхности 1000 гПа модели COSMO-RU07 производился расчет ВНГО и сравнение результатов с наблюдаемой ВНГО в срок прогноза. Принимались во внимание следующие соображения.

Прежде всего предстояло оценить точность расчета ВНГО по прогностическим предикторам на уровне 2 м («на подстилающей поверхности») и на поверхности 1000 гПа. Расчеты по (1) показали, что при использовании прогностических данных COSMO-RU07 на уровне 2 м результаты оказываются хуже (т. е. уровень согласия с наблюдениями на аэродроме, определяемый по коэффициенту корреляции, по систематической, абсолютной и среднеквадратической ошибкам и по критерию Пирси ниже, чем при использовании прогностических данных на поверхности 1000 гПа). В дальнейшем именно данные о температуре и влажности на поверхности 1000 гПа использовались в качестве предикторов.

Далее принимаем во внимание, что формула (1) применительно к ВНГО < 300 м в сущности означает разделение выборки на подвыборки «наличия» и «отсутствия» по пороговому значению 1,44 °С. Это пороговое значение (а по существу коэффициент 208 в (1)) было в свое время выбрано эмпирически, на основе доступных автору [7] материалов наблюдений. Переходя к модельным данным, представляется логичным выбрать для каждого аэродрома пороговое значение, которое бы обеспечивало наилучший результат на этих данных. Естественно ожидать, что пороговое значение дефицита точки росы, предсказанного моделью, будет отличаться от того, которое получено по синхронным натурным данным в [7].

Метод пороговых значений предикторов широко применяется в задачах авиационного прогноза, когда на основании сеточных предикторов приходится прогнозировать

подсеточные явления (турбулентность, обледенение, облачность, видимость). Этот же метод применен нами и в настоящей работе.

Архив модельных данных COSMO-RU07 был разделен на зависимую (обучающую) и независимую выборки, охватывающие периоды апрель 2010 – сентябрь 2011 г. и октябрь 2011 – июль 2012 г. соответственно. Характерные объемы выборок (несколько различающиеся на разных аэродромах) составляли, соответственно, 1000 и 600 случаев (прогностические поля архивировались за сроки 0 и 12 ч ВСВ). В качестве первого шага к модельным значениям предикторов полной (суммарной) выборки была применена формула (1) для прогноза облачности ≥ 5 окт с ВНГО ≤ 300 м. Результаты представлены в табл. 5. Они оказались достаточно высокими для практических целей: по всем аэродромам критерии Пирси превышали 0,30, а в среднем по 21 аэродрому было получено $PI = 0,528$. Исключение составил аэродром Сочи, для которого критерий PI оказался незначимым. (В табл. 4, 5 и 6, за недостатком места, приводятся результаты расчетов только для 21 российского аэродрома, а не для всех рассмотренных 45).

Был предпринят ряд попыток повысить успешность прогноза ВНГО путем варьирования порогового значения дефицита точки росы, а также путем построения для каждого аэродрома решающих правил, включающих пороговые значения двух параметров – дефицита точки росы и температуры. Эти значения ограничивают квадрат на плоскости параметров, в котором преимущественно сосредотачиваются случаи наличия явления, так что критерий Пирси принимает максимальное для данного аэродрома значение. В качестве предиктантов использовались бинарные переменные – наличие либо отсутствие ВНГО ≤ 100 и ВНГО ≤ 300 м. На зависимой выборке были получены такие пороговые значения для каждого аэродрома, показанные в табл. 5 для ВНГО ≤ 300 м. Это позволило повысить успешность разделения случаев наличия и отсутствия ВНГО в соответствующих диапазонах. Можно заметить, что пороговые значения дефицита точки росы, обеспечивающие максимальные PI , в целом выше на юге области. Физический смысл ограничений интервала температур, в котором следует прогнозировать наличие низкой облачности, состоит, по видимому, в том, что как очень низкие температуры зимой, так и очень высокие летом характерны для безоблачной и малооблачной погоды.

Для ВНГО ≤ 100 м прогноз на зависимой выборке модельных данных в целом оказался неудачным: только по некоторым (менее половины) аэродромам критерии Пирси превысили 0,30.

При переходе к независимой выборке модельных данных успешность прогноза в целом понижается во всех вариантах (табл. 6), хотя по отдельным аэродромам и в определенных вариантах расчета получены несколько более высокие PI , чем на зависимой выборке. Это

объясняется как малым объемом выборок, так и особенностями погодных процессов в тот и другой периоды в конкретных районах. Тем не менее, прогноз остается значимым и вполне успешным на всех аэродромах, кроме Сочи, по-видимому, из-за особых условий образования облачности над этим аэродромом. Влияние сложной орографии и близости моря проявляется в очень низкой (минимальной по всем 45 аэродромам, для которых имеется база данных METAR) повторяемости облаков нижнего яруса, при аномальном годовом ходе: так, повторяемость облачности 8 окт в среднем за год составляет здесь 5,7 % с максимумом весной (12,0 %) и минимумом осенью (2,1 %). Причиной неудачи с модельным прогнозом может быть и неудачный выбор узла сетки: он взят ближайшим к аэродрому, однако, возможно, более близким по физическим и климатическим условиям был бы другой (соседний) квадрат сетки. (Это предположение подлежит проверке.) Напомним, что идеальный прогноз по синхронным данным METAR (табл. 4) оказывается успешным, в отличие от модельного прогноза.

В заключение данного раздела отметим, что расчеты ВНГО выполнялись и по прогностическим полям моделей ПЛАВ и NCEP. Результаты применения к этим полям методов пороговых значений, перечисленных в табл. 5, оказались неудовлетворительными как для ВНГО ≤ 100 м, так и ≤ 300 м, и только для ВНГО ≤ 600 м значения критерия Пирси оказались значимыми на подавляющем большинстве аэродромов. Причина такой неудачи очевидна, она состоит в низком, по сравнению с моделью COSMO-RU07, горизонтальном разрешении как модели ПЛАВ, так и доступных нам данных модели NCEP. Шаг модели COSMO-RU07, равный 7 км, можно считать оптимальным для авиационного прогноза, поскольку он соответствует характерному размеру зоны захода на посадку и зоны визуального обзора наблюдателя АМСГ. В данном случае эффект горизонтального разрешения проявляется особенно явно.

Заключение

На материале аэродромных измерений высоты нижней границы облаков нижнего яруса, температуры и влажности, а также результатов краткосрочного (на 24 ч) прогноза по мезомасштабной модели COSMO-RU07 с шагом по горизонтали 7 км исследованы особенности временного хода и изменчивости ВНГО (продолжительность эпизодов наличия низкой облачности, изменение высоты облаков со временем, автокорреляционные функции ВНГО) и возможности прогноза этой величины на основе модельных значений температуры и влажности. Анализ проведен для 45 аэродромов на территории европейской части бывшего СССР, на которых производятся регулярные наблюдения каждые 30 мин или 1 ч; выборка данных охватывает 10-летний период.

Изучение изменчивости ВНГО во времени приводит к выводу, что характерное время важных для авиации изменений ВНГО составляет в среднем величину порядка 2 ч. Такие изменения могут улавливаться прогнозами, период действия которых сравним с указанным характерным временем. Этому требованию удовлетворяют сверхкраткосрочный прогноз и наукастинг. Краткосрочные же прогнозы ВНГО, период действия которых составляет в лучшем случае 6 ч, могут быть только ориентировочными. В соответствии с этим выводом в статье принята формулировка предиктанта в бинарном виде наличия либо отсутствия ВНГО ≤ 300 м: данная градация включает все потенциально опасные для взлета и посадки воздушных судов значения ВНГО. Вместе с тем, учитывая особую важность прогноза самых низких облаков, исследована также возможность прогноза ВНГО ≤ 100 м в конкретный срок.

Как эмпирические данные, так и теоретические исследования показывают, что высота низкой облачности определяется, прежде всего, дефицитом точки росы у земли. На выборке данных аэродромных наблюдений (дневников погоды и телеграмм в коде METAR) показано, что с помощью порогового значения дефицита точки росы (формула Е.С. Селезневой) удается диагностировать наличие ВНГО ≤ 300 м на всех рассмотренных аэродромах с практически значимой успешностью. Переходя от синхронных наблюдаемых значений предиктора к его прогностическим модельным значениям (на поверхности 1000 гПа), получаем достаточно высокую успешность прогноза ВНГО ≤ 300 м, которая еще повышается (до $PI = 0,60$ в среднем по всем аэродромам на суммарной выборке) при использовании температуры воздуха в качестве второго предиктора, для которого также определяются пороговые значения. Расчет ВНГО ≤ 100 м по синхронным данным аэродромных наблюдений также оказывается успешным, но модельные значения предикторов не позволяют получить на всех аэродромах значимой успешности прогноза этой градации высот низкой облачности.

Попытки использования для прогноза ВНГО выходных данных глобальных моделей с шагами по географическим координатам $0,9$ и $0,72^\circ$ (оперативная модель ПЛАВ Гидрометцентра России) или 1° (модель NCEP (США)) дали неудовлетворительные результаты, очевидно из-за низкого горизонтального разрешения моделей: значимые PI получены лишь для ВНГО ≤ 600 м.

Таким образом, применение для краткосрочного прогноза высоты нижней границы облаков нижнего яруса простой схемы постпроцессинга прогностических полей температуры и влажности модели COSMO-RU07 с заблаговременностью 24 ч позволяет получить практически значимый результат – прогноз наличия низкой облачности с нижней границей ≤ 300 м при количестве облачности ≥ 5 окт на Европейской территории России и сопредельных государств.

Список использованных источников

1. *Абрамович К.Г.* Условия образования и прогноз низких облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 124 с.
2. *Баранов А.М., Мазурин Н.И., Солонин С.В., Янковский И.А.* Авиационная метеорология. – Л., Гидрометеиздат, 1966. – 286 с.
3. *Богданова Н.П., Швец М. Е.* Об определении нижней границы внутримассовых слоистых облаков // Труды ГГО. – 1959: . – Вып. 81. – С. 13–19.
4. *Будыко М.И., Юдин М.И.* Теплообмен поверхности земли с атмосферой и равновесный градиент температуры // Метеорология и гидрология. – 1948. – № 1. – С. 3–16.
5. *Вагер Б.Г., Зилитинкевич С.С.* Метод расчета высоты нижней границы облаков по данным численного прогноза погоды // Труды ГГО. – 1966. – Вып. 187. – С. 3–12.
6. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации / Под ред. Абрамовича К.Г., Васильева А.А. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 301 с.
7. *Селезнева Е.С.* О высоте нижней границы внутримассовых облаков // Труды ГГО. – 1956. – Вып. 63 (105). – С. 2–31.
8. *Швец М.Е., Каменская О.А.* О методе определения высоты нижней границы внутримассовых слоистых облаков // Труды ЛГМИ. – 1956. – Вып. 5– 6. – С. 201–207.
9. *Bergot T., Carrer D., Noilhan J., Bougeault P.* Improved site-specific numerical prediction of fog and low clouds: a feasibility // Wea. Forecast. – 2005. – Vol. 20, No. 2. – P. 627–646.
10. *Boccieri J.R., Cristi R.L., Glahn H.R., Lewis F., Globokar F.T.* Recent development in automated prediction of ceiling and visibility // J. Appl. Meteorol. – 1974. – Vol. 13, No. 3. – P. 277–288.
11. *Ghirardelli J.E., Glahn B.* The meteorological development Laboratory’s aviation weather prediction system // Wea. Forecast. – 2010. – Vol. 25, No. 7. – P. 1027–1051.
12. *Glahn H.R.* An application of adaptive logic to meteorological prediction // J. Appl. Meteorol. – 1964. – Vol. 3, No. 12. – P. 718–725.
13. *Goldman L.* On forecasting ceiling lowering during continuous rain // Mon. Weather Rev. – 1951. – No. 7. – P. 133–142.
14. *Hilliker J.L., Fritsch J.M.* An observation-based statistical system for warm-season hourly probabilistic forecasts of low ceiling at the San Francisco International airport // J. Appl. Meteorol. – 1999. – Vol. 18, No. 12. – P. 892–1705.
15. *Leyton S.M., Fritsch J.M.* Short-term probabilistic forecasts of ceiling and visibility utilizing high-density surface weather observations // Wea. Forecast. – 2003. – Vol. 18, No. 10. – P. 891–902.
16. *Leyton S.M., Fritsch J.M.* The impact of high-frequency surface weather observations on short-term probabilistic forecasts of ceiling and visibility // Wea. Forecast. – 2004. – Vol. 19, No. 1. – P. 145–157.
17. *Roquelaure S., Bergot T.* A local ensemble prediction system for visibility and low clouds: construction, Bayesian model averaging calibration, and validation // J. Appl. Meteorol. – Climatol. – 2008. – Vol. 47, No. 12. – P. 3072–3088.

18. *Roquelaure S., Tardif R., Remy S., Bergot T.* Skill of a ceiling and visibility local ensemble prediction system (LEPS) according to fog-type prediction at Paris – Charles de Gaulle Airport // *Wea. Forecast.* – 2009. – Vol. 24, No. 12. – P. 1511–1523.

19. *Rudack D.E., Ghirardelli J.E.* A comparative verification of localized aviation model output statistic program (LAMP) and numerical weather prediction (NWP) model forecasts of ceiling height and visibility // *Wea. Forecast.* – 2010. – Vol. 25, No. 8. – P. 1101–1178.

20. *Stoelinga M.T., Warner T.T.* Nonhydrostatic, mesobeta-scale simulations of cloud ceiling and visibility for an East Coast winter precipitation event // *J. Appl. Meteorol.* – 1999. – Vol. 38, No. 4. – P. 385-404.

21. *Vislocky R.I., Fritsch J.M.* An automated, observations-based system for short-term prediction of ceiling and visibility // *Wea. Forecast.* – 1997. – Vol. 12, No. 3. – P. 31-43.

Поступила в редакцию 3.09.2012 г.

Таблица 1

Среднегодовое распределение (%) эпизодов низкой облачности по их продолжительности при количестве облачности 8 окт (2001–2010 гг.), согласно данным телеграмм METAR

Аэродромы	Продолжительность эпизода, ч											Среднее за год число эпизодов
	0–1	1–2	2–3	3–6	6–12	12–18	18–24	24–36	36–48	48–96	>96	
Мурманск	50,5	20,5	10,9	12,6	4,6	0,5	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	262
Архангельск	34,1	20,1	11,3	18,4	10,8	3,3	1,7	0,3	0,1	0,0	0,0	320
Салехард	51,1	17,2	8,3	15,5	5,3	2,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	64
Сыктывкар	36,5	30,4	13,0	10,4	6,4	1,6	1,1	0,3	0,1	0,1	0,0	473
Ханты-Мансийск	44,0	13,4	11,1	13,6	12,8	3,9	0,9	0,2	0,0	0,0	0,0	94
Таллинн	50,5	15,7	7,2	11,0	7,8	3,1	2,0	1,5	0,5	0,6	0,1	658
С.-Петербург	32,7	15,9	10,3	17,3	12,6	5,4	2,0	2,3	0,7	0,7	0,1	386
Рига	36,0	16,0	8,5	12,9	11,5	5,5	2,8	3,1	1,3	2,0	0,5	438
Вильнюс	34,2	13,4	8,4	14,5	13,3	6,2	2,9	3,2	1,3	2,2	0,4	387
Минск	33,4	14,7	8,5	15,5	12,8	5,7	2,8	2,9	1,2	1,9	0,4	339
Н.Новгород	30,9	18,0	23,3	8,9	7,4	3,9	2,4	2,4	1,2	1,5	0,1	428
М.Шереметьево	32,0	15,5	9,2	16,4	12,8	6,2	2,9	2,4	0,8	1,4	0,3	283
М.Внуково	49,0	15,2	11,0	11,5	6,8	2,9	1,5	1,0	0,5	0,5	0,1	415
Казань	28,2	13,5	9,4	15,2	16,2	7,2	3,1	3,6	1,3	2,1	0,2	227
М.Домодедово	52,9	13,0	8,7	12,8	7,0	2,8	1,0	1,1	0,3	0,3	0,0	310
Ульяновск	30,5	14,8	9,6	19,3	14,9	5,4	2,8	1,6	0,4	0,7	0,0	243
Нижнекамск	42,6	11,8	8,1	14,0	11,5	5,5	2,3	2,2	0,9	0,9	0,1	332
Уфа	24,2	14,0	10,9	17,9	16,1	7,9	3,4	3,1	0,9	1,5	0,0	212
Самара	33,3	16,2	10,3	16,1	14,4	4,8	2,2	1,4	0,8	0,5	0,0	149
Брест	33,9	17,6	11,8	18,5	12,6	4,9	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	244
Гомель	30,4	14,1	9,3	17,3	13,3	7,1	3,1	2,9	1,0	1,3	0,1	244
Киев	46,5	14,8	7,3	12,6	8,2	3,9	2,4	2,1	1,1	0,9	0,1	397
Львов	31,0	14,4	9,2	15,2	14,2	6,2	3,5	3,1	1,5	1,6	0,2	278
Кривой Рог	18,8	10,3	9,5	17,3	18,4	9,2	3,9	5,0	2,4	4,2	1,0	166
Кишинев	40,3	15,1	9,3	14,3	10,6	4,3	1,9	2,2	0,7	1,0	0,3	241
Одесса	35,5	17,7	10,2	15,3	9,9	4,1	2,6	2,3	1,1	1,1	0,1	282
Симферополь	44,3	16,5	9,5	12,3	10,1	3,4	1,4	1,4	0,6	0,4	0,1	327
Воронеж	43,3	23,4	5,0	8,2	8,5	4,3	3,1	2,2	1,0	1,0	0,1	319
Саратов	26,0	12,9	8,1	15,6	13,8	8,6	3,9	4,1	3,0	3,5	0,7	184
Харьков	30,9	15,1	9,0	16,9	13,5	5,6	3,2	2,5	1,1	1,8	0,3	334
Днепропетровск	29,2	13,2	9,2	15,4	14,2	7,3	3,4	3,3	1,6	2,7	0,4	203
Донецк	29,9	12,7	9,7	14,6	14,5	7,3	3,8	3,3	1,9	2,0	0,4	247
Луганск	26,1	12,6	9,7	16,4	16,7	8,8	2,9	3,0	1,9	1,6	0,3	136
Волгоград	31,5	15,0	10,5	15,3	13,5	5,6	2,8	3,1	1,3	1,0	0,3	210
Запорожье	26,2	15,1	9,6	17,6	17,9	6,6	2,6	2,5	1,3	0,5	0,1	134
Ростов-на-Дону	37,7	16,4	9,2	20,0	9,4	3,2	1,3	1,3	0,9	0,4	0,0	242
Астрахань	33,4	14,7	10,7	15,8	12,2	5,5	2,4	2,8	0,6	1,6	0,2	255
Краснодар	39,8	17,3	11,9	15,6	9,2	3,2	1,2	0,9	0,5	0,4	0,0	224
Ставрополь	26,1	12,5	10,9	17,8	17,3	7,1	3,0	3,6	0,8	0,8	0,0	144
Анапа	53,2	23,9	8,9	7,8	4,3	1,4	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	232
Майкоп	31,3	15,9	11,9	16,7	14,2	5,7	2,5	1,3	0,56	0,2	0,0	131
Мин.Воды	38,0	15,9	10,5	13,2	11,0	4,8	2,4	1,8	0,7	1,5	0,2	378
Сочи	48,9	17,1	10,7	12,1	7,7	2,2	0,4	0,8	0,1	0,1	0,0	158
Нальчик	28,9	16,5	11,9	18,6	15,7	3,9	1,5	1,6	0,9	0,6	0,0	232
Махачкала	22,8	12,0	8,2	17,2	18,9	8,8	4,2	3,9	2,2	1,6	0,2	165

Доля случаев НО8 в различных диапазонах ВНГО в среднем за год

Аэродромы	ВНГО, м							Число случаев
	≤ 90	90-150	150-300	300-450	450-600	600-1000	1000-1500	
Мурманск	27,5	20,1	25,7	12,0	8,7	5,9	0,1	8086
Архангельск	10,9	18,8	34,1	19,5	8,6	7,8	0,2	14770
Салехард	83,5	10,8	4,8	0,5	0,1	0,4	0,0	2228
Сыктывкар	8,0	9,9	34,4	19,1	9,0	13,6	6,0	17574
Ханты-Мансийск	33,0	28,5	35,7	2,3	0,3	0,2	0,1	4647
Таллинн	14,1	19,0	34,5	13,7	6,7	9,2	2,9	37859
С.-Петербург	9,8	12,3	32,8	16,9	9,6	12,6	6,0	30724
Рига	13,7	12,8	25,3	15,3	11,0	13,9	8,1	49232
Вильнюс	30,7	21,8	27,1	9,4	4,8	4,6	1,7	46141
Минск	27,0	15,7	24,9	12,3	8,4	7,7	4,1	37413
Н.Новгород	6,9	10,3	37,9	23,3	11,3	8,7	1,5	36175
М.Шереметьево	7,3	11,6	42,9	21,1	8,0	7,1	2,1	28391
М.Внуково	13,2	16,8	45,7	12,9	5,3	5,2	0,9	23667
Казань	11,5	11,5	29,9	16,7	10,1	13,7	6,7	28240
М.Домодедово	19,0	16,6	31,7	14,4	7,4	9,3	1,7	16002
Ульяновск	4,8	7,5	30,9	24,1	13,4	14,4	5,0	19322
Нижнекамск	15,5	19,2	31,4	15,1	7,5	8,7	2,6	28012
Уфа	5,6	5,0	20,1	21,5	17,9	21,6	8,2	22266
Самара	24,8	29,7	44,2	1,1	0,1	0,0	0,0	11808
Брест	13,7	18,4	33,0	15,1	11,0	8,1	0,7	9168
Гомель	20,7	13,2	28,5	15,0	8,3	10,8	3,5	18272
Киев	20,2	12,9	25,4	15,4	10,5	10,8	4,8	29620
Львов	19,2	15,5	24,6	10,6	7,8	13,5	8,8	30407
Кривой Рог	20,9	12,2	27,9	14,4	8,5	12,0	4,1	29849
Кишинев	24,2	11,9	23,1	11,4	8,2	12,9	8,3	21522
Одесса	19,7	14,3	32,4	15,7	9,1	6,7	2,1	22597
Симферополь	29,7	13,3	21,3	12,1	7,4	10,6	5,7	20642
Воронеж	20,8	24,2	36,3	9,7	4,0	3,7	1,3	15984
Саратов	29,3	14,1	22,4	13,2	7,8	9,7	3,6	30765
Харьков	12,8	11,1	31,1	15,8	13,8	13,1	2,3	36107
Днепропетровск	34,7	15,3	25,1	10,4	6,0	6,6	1,7	25874
Донецк	31,2	19,6	31,3	10,6	4,4	2,4	0,5	30756
Луганск	34,4	21,2	31,2	11,0	1,7	0,4	0,0	15625
Волгоград	41,2	15,8	21,0	9,2	6,2	5,7	0,9	21179
Запорожье	51,6	21,3	24,4	1,6	0,7	0,4	0,0	10920
Ростов-на-Дону	34,8	16,1	29,2	11,2	5,4	3,3	0,0	16101
Астрахань	13,9	11,3	28,7	17,0	10,4	13,5	5,2	24049
Краснодар	22,7	8,7	19,8	12,0	9,8	15,7	11,4	12944
Ставрополь	49,7	20,3	24,2	3,8	1,2	0,8	0,0	14128
Анапа	13,1	12,8	35,2	15,6	7,6	10,9	4,8	6234
Майкоп	15,1	15,2	24,9	14,8	9,6	14,6	5,7	7188
Мин.Воды	27,7	15,4	24,7	11,9	6,8	8,1	5,4	32339
Сочи	6,5	7,1	18,7	16,4	13,0	17,8	20,7	6684
Нальчик	43,2	9,0	19,8	8,7	6,4	8,4	4,3	8489
Махачкала	9,6	7,0	17,1	16,3	17,7	25,1	7,3	9708

**Характеристики успешности применения формулы Е.С. Селезневой (1)
для расчета ВНГО по данным дневников погоды (1996-2005 гг.)
при облачности ≥ 5 окт (объем выборки 175344 срока)**

Аэродром	Повторяемость, %	Оправд. прогноза наличия, %	Предупреж- денность наличия, %	Критерий Пирси
<i>Предиктант: ВНГО ≤ 300 м</i>				
Шереметьево	16,5	47,6	81,1	0,634
Внуково	21,3	57,7	82,0	0,658
Домодедово	16,7	40,8	76,7	0,544
<i>Предиктант: ВНГО ≤ 100 м</i>				
Шереметьево	1,3	26,1	65,0	0,625
Внуково	3,1	30,4	68,2	0,632
Домодедово	1,7	10,5	29,5	0,251

**Успешность расчета ВНГО ниже 100 и 300 м по (1) по данным телеграмм METAR
(2001-2010 гг.) при облачности ≥ 5 окт**

Аэродромы	Кэф. коррел	Число случ.	PI		Ошибки, м, ВНГО ≤ 300 м		
			≤ 100 м	≤ 300 м	Арифм	Абс.	Ср.-кв.
Архангельск	0.57	28595	.396	.417	31	137	190
Сыктывкар	0.63	32877	.402	.482	12	129	176
С.-Петербург	0.53	65314	.340	.469	45	134	199
Минск	0.67	63652	.607	.521	-57	95	117
Н.Новгород	0.50	63930	.343	.433	118	191	379
М.Шереметьево	0.65	53435	.561	.575	34	123	317
М.Внуково	0.61	61096	.488	.558	26	129	280
М.Домодедово	0.58	58750	.362	.559	72	127	238
Нижекамск	0.56	43420	.447	.454	81	158	237
Самара	0.48	38890	.371	.316	-38	111	143
Воронеж	0.63	34867	.548	.515	7	129	221
Саратов	0.68	48671	.674	.621	-5	107	150
Волгоград	0.67	42334	.446	.589	45	112	160
Ростов-на-Дону	0.73	41499	.617	.614	56	127	229
Астрахань	0.63	36306	.583	.592	43	121	199
Краснодар	0.49	31805	.507	.564	10	110	171
Ставрополь	0.74	28857	.657	.577	21	98	148
Анапа	0.55	22009	.464	.535	65	136	236
Минеральные Воды	0.63	67447	.510	.550	116	161	327
Сочи	0.49	23783	.546	.459	-37	113	154
Нальчик	0,72	15871	.697	.664	1	85	122

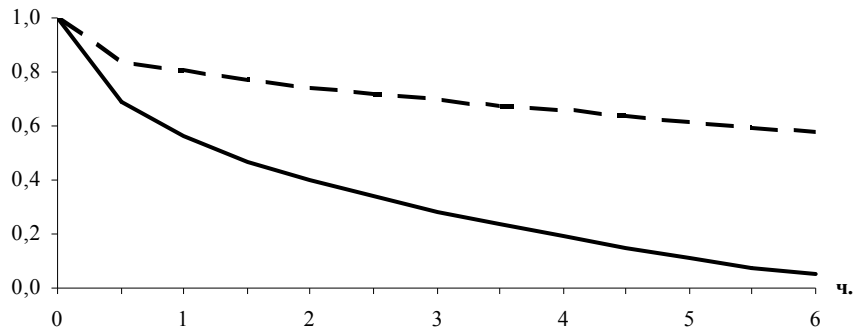
Успешность (PI) прогноза ВНГО ≤ 300 м на 24 ч на зависимой выборке прогностических данных модели COSMO-RU07 с использованием различных пороговых значений (Т- τ) °С;

значение (Т- τ)_n = 1,44 соответствует формуле Е.С. Селезневой (1)

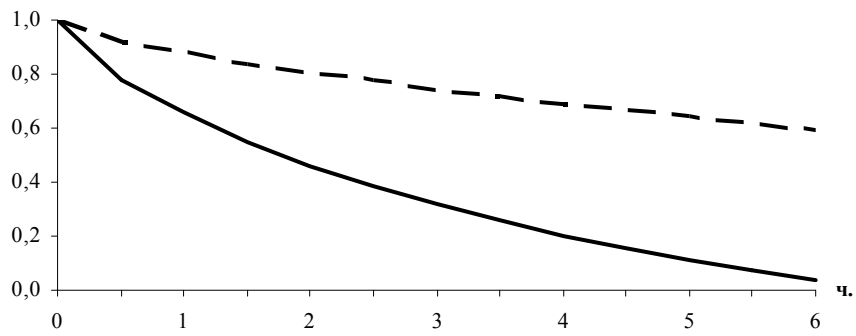
Аэродромы	Число случ.	PI, (Т- τ) _n =1.44	Другие (Т- τ) _n		Решающие правила		
			(Т- τ) _n	PI _{max}	Пределы (Т- τ) _n	Пределы Т, °С	PI
Архангельск	421	.398	2,5	.544	$\leq 3,0$	[-20, 10]	.444
Сыктывкар	445	.437	2,0	.597	$\leq 2,5$	[-15,11]	.571
С.-Петербург	900	.474	2,2	.507	$\leq 1,2$	[-15,18]	.434
Минск	834	.455	2,5	.438	$\leq 2,0$	[-15,20]	.449
Н.Новгород	885	.414	2,0	.544	$\leq 2,0$	[-15,15]	.530
М.Шереметьево	815	.677	2,0	.632	$\leq 1,5$	[-10,20]	.646
М.Внуково	856	.579	2,0	.585	$\leq 2,0$	[-15,20]	.574
М.Домодедово	821	.596	2,0	.663	$\leq 2,0$	[-15,15]	.625
Нижекамск	730	.510	2,2	.655	$\leq 2,5$	[-15,15]	.639
Самара	901	.503	2,2	.637	$\leq 2,5$	[-15,15]	.599
Воронеж	801	.532	2,5	.683	$\leq 2,5$	[-15,15]	.664
Саратов	837	.517	4,0	.664	$\leq 3,0$	[-10,15]	.660
Волгоград	845	.601	2,5	.728	$\leq 2,0$	[-5, 10]	.650
Ростов-на-Дону	887	.523	4,0	.629	$\leq 4,0$	[-8,15]	.681
Астрахань	877	.377	4,0	.564	$\leq 2,0$	[-3, 11]	.521
Краснодар	893	.443	3,5	.601	$\leq 3,0$	[-4, 10]	.593
Ставрополь	860	.629	2,0	.689	$\leq 2,5$	[-5, 15]	.703
Анапа	856	.409	2,5	.518	$\leq 3,0$	[-2, 15]	.561
Минеральные Воды	800	.622	3,0	.658	$\leq 3,0$	[-10, 15]	.700
Сочи	796	.287	3,0	.450	$\leq 4,0$	[5,17]	.534
Нальчик	777	.577	3,0	.662	$\leq 4,0$	[-10,20]	.689
Всего	16837	.528	–	.602	–	–	.618

**Успешность (PI) прогноза ВНГО ≤ 300 м на 24 ч на независимой и суммарной выборках
прогностических данных модели COSMO-RU07 с использованием тех же пороговых
значений, что и в табл. 5**

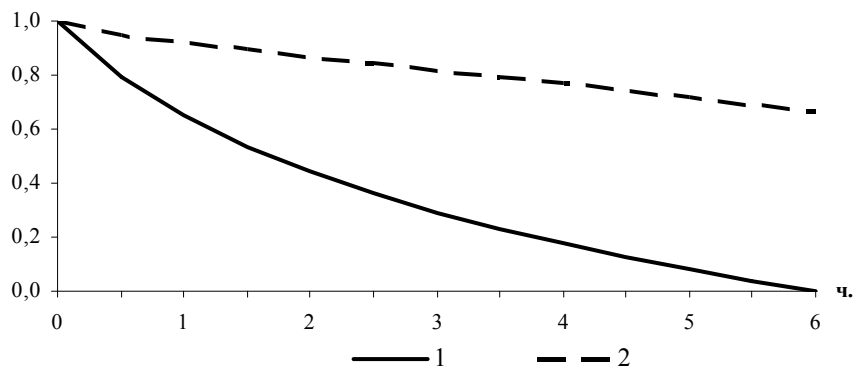
Аэродромы	Число случ. сумм- марной выбор.	(T- τ) _n =1.44°C		Другие пороговые значения		Решающие правила	
		Незави- симая выборка	Суммар- ная выборка	Незави- симая выборка	Суммар- ная выборка	Независи- мая выборка	Суммар- ная выборка
Архангельск	591	.663	.479	.529	.540	.450	.446
Сыктывкар	711	.560	.478	.615	.600	.546	.558
С.-Петербург	1442	.553	.503	.522	.513	.495	.456
Минск	1345	.517	.483	.542	.481	.499	.469
Н.Новгород	1418	.536	.466	.529	.541	.537	.535
М.Шереметьево	1308	.632	.661	.523	.590	.602	.631
М.Внуково	1384	.550	.570	.497	.551	.516	.553
М.Домодедово	1319	.584	.594	.564	.626	.614	.623
Нижекамск	1164	.576	.532	.628	.643	.629	.632
Самара	1444	.595	.538	.663	.647	.603	.601
Воронеж	1301	.608	.565	.640	.669	.652	.662
Саратов	1357	.491	.509	.556	.627	.537	.612
Волгоград	1368	.603	.607	.650	.704	.600	.633
Ростов-на-Дону	1424	.501	.517	.515	.588	.500	.610
Астрахань	1401	.393	.383	.649	.596	.528	.523
Краснодар	1436	.490	.458	.544	.578	.393	.524
Ставрополь	1386	.517	.595	.640	.669	.695	.697
Анапа	1387	.442	.421	.497	.510	.532	.550
Минеральные Воды	1291	.545	.597	.532	.615	.567	.654
Сочи	1277	.116	.222	.236	.368	.289	.440
Нальчик	1255	.452	.538	.597	.641	.614	.662
Всего	27009	.546	.535	.556	.585	.581	.604



Шереметьево



Внуково



Домодедово

Рисунок. Автокорреляционные функции ВНГО на аэродромах Шереметьево, Внуково и Домодедово с учетом моментов появления и исчезновения низкой облачности (1) и в предположении ее непрерывного существования (2).