

УДК 551.5:001.891.57

Режим низкой облачности и прогноз высоты ее нижней границы на аэродромах азиатской территории России

Н.П. Шакина, Е.Н. Скриптунова

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
chakina@mecom.ru*

По материалам аэродромных наблюдений в коде METAR приводятся данные о повторяемости низкой (высота нижней границы облаков ВНГО ≤ 1500 м) облачности на 41 аэродроме азиатской территории России и ближнего зарубежья по градациям ВНГО, в годовом ходе, в зависимости от направления и скорости ветра. Оценена возможность краткосрочного прогнозирования низкой облачности на основе выходной продукции модели COSMO-Ru13. Получены статистические соотношения для прогноза, со значимыми критериями Пирса – Обухова и Хайдке – Багрова, наличия облачности в количестве ≥ 5 окт с ВНГО ≤ 300 м с заблаговременностью 12 и 24 ч по 19 и 16 аэродромам соответственно, причем в качестве предикторов используются модельные прогностические значения температуры, влажности, скорости ветра, а также балл модельной облачности.

Ключевые слова: низкая облачность, аэродромные наблюдения, численный прогноз, пост-процессинг, модель COSMO-Ru13, авиационный прогноз

Regime of low clouds and ceiling forecasting at the aerodromes in Asian Russia

N.P. Shakina, E.N. Skriptunova

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
chakina@mecom.ru*

Based on the METAR aerodrome observations, data on the occurrence frequency of low clouds (the ceiling is ≤ 1500 m) at 41 aerodromes in Asian Russia and the neighboring republics of the former USSR are presented for the ceiling ranges, the annual cycle, and various wind directions and wind speed. The possibility of the ceiling short-range forecasting based on the COSMO-Ru13 model output data is estimated. Statistical relationships (with significant Peirce and Heidke skill scores) are obtained for the forecasts of clouds with the amount of ≥ 5 oktas with the ceiling of ≤ 300 m with the 12- and 24-hour lead time for 19 and 16 aerodromes, respectively. Model output data on temperature, humidity, wind speed, and cloud amount are used as predictors.

Keywords: low clouds, aerodrome observations, numerical prediction, post-processing, COSMO-Ru13 model, aviation forecasting

Низкая облачность наряду с туманами является основным фактором, затрудняющим взлет и посадку воздушных судов и их полеты на малых высотах [6]. Применительно к метеорологическому обеспечению авиации облачностью, значимой для полетов, считается, кроме конвективной, облачность с нижней границей до 1500 м. (В данной работе мы не рассматриваем конвективную облачность.) Полеты в облаках, между облаками и под облаками при низкой высоте нижней границы облаков (ВНГО) и ограниченной видимости относятся к полетам в сложных метеорологических условиях. Очень велико влияние облачности и ее ВНГО на взлет и в особенности на посадку воздушных судов. Поэтому информация о ВНГО и, в частности, ее прогноз являются важной составляющей метеорологического обеспечения авиации.

В настоящей статье исследуются возможности прогноза ВНГО на основе продукции оперативно используемой в Гидрометцентре России численной модели, каковой в настоящее время является региональная модель COSMO-Ru13. Рассмотрение ограничивается краткосрочным прогнозом (с заблаговременностью 12 и 24 ч), однако, поскольку модельные предикторы являются синхронными, не только качественные выводы, но и методика проведенного в данной статье исследования пригодны и для меньших заблаговременностей, если для них можно получить прогностические значения предикторов.

Азиатская территория России характеризуется большим разнообразием физико-географических и циркуляционных условий, определяющих режим низкой облачности на аэродромах этой территории, в настоящее время остающийся малоизученным. В литературе имеются отдельные указания на те или иные его особенности на конкретных аэродромах, но, насколько известно авторам, систематических исследований не существует. Ниже представлены некоторые режимные характеристики низкой облачности на 41 аэродроме азиатской части России и ближнего зарубежья, полученные на основании телеграмм в коде METAR за период с 2001 по 2018 г. Информация указанных телеграмм, составляемых каждые 30 мин (реже 1 ч), сведена в базу данных, которая использована как для расчета режимных характеристик, так и для разработки методов прогноза ВНГО. В последнем случае ставилась цель отыскания статистических зависимостей между величинами, прогнозируемыми численной моделью (именно, оперативно используемой в настоящее время моделью COSMO-Ru13), и наличием либо отсутствием низких облаков с ВНГО в определенной градации при значимом для полетов их количестве.

В соответствии с резкими различиями в физико-географических и циркуляционных условиях различных аэродромов, повторяемость низкой облачности и ее распределение по градациям ВНГО сильно различаются (рис. 1). Наиболее «безоблачным» является аэродром Чита (в среднем за год повторяемость ВНГО ≤ 1500 м составляет 1 %, а в годовом ходе осенний максимум равен 1,4 %), но из этих немногочисленных случаев в 74,3 % отмечается ВНГО ≤ 90 м. Сходное распределение повторяемости

различных градаций ВНГО наблюдается в Братске, Улан-Удэ, Абакане. Самая высокая среднегодовая повторяемость низкой облачности – на аэродроме Тикси (35,4 %) с летним максимумом 51,4 %.

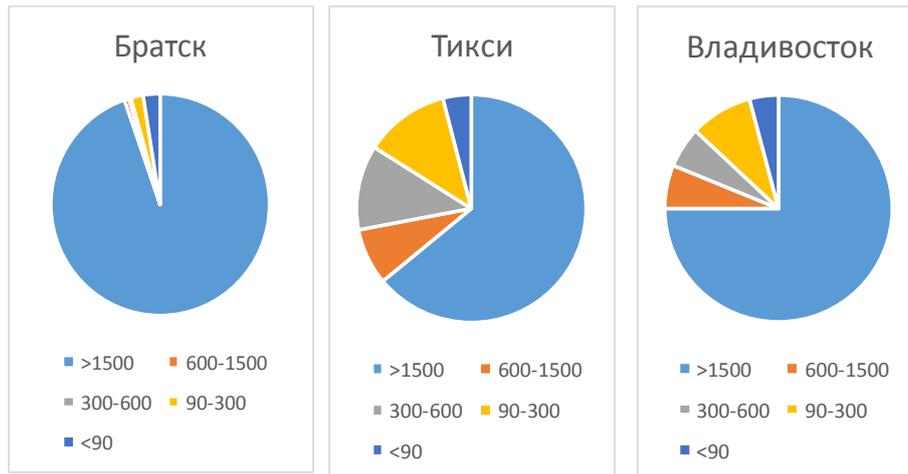


Рис. 1. Среднегодовая повторяемость облачности ≥ 5 окт в зависимости от высоты нижней границы (м) на аэродромах Братск, Тикси и Владивосток за период 2001–2018 гг.

Fig. 1. Annual mean occurrence frequency of cloud amount ≥ 5 oct as dependent on ceiling height (m) at the aerodromes of Bratsk, Tiksi, and Vladivostok, 2001-2018.

В ряде случаев сезонные максимумы превышают 40 %, они достигаются чаще всего осенью или зимой, а на Дальнем Востоке – летом, что объясняется эффектами муссонного климата; сюда же относятся Магадан, Мирный, Полярный и Тикси. В целом по характеру годового хода четко выделяются две группы – с максимальной повторяемостью низкой облачности в холодный (осенне-зимний) период и в теплый период (рис. 2).

Первая группа более многочисленна, к ней можно отнести 27 аэродромов из 41, включая большую часть северных, западно-сибирских аэродромов и все аэродромы Средней Азии; в пределах этой группы выделяются аэродромы с максимальной повторяемостью в августе – октябре (Норильск, Норюнгри) или в октябре-ноябре (Нижевартовск, Омск, Улан-Удэ), тогда как в феврале-марте эта повторяемость минимальна (рис. 3). Ко второй группе, кроме упомянутых выше четырех северных аэродромов, относится ряд аэродромов Дальнего Востока (Николаевск, Благовещенск, Хабаровск, Владивосток, Южно-Сахалинск, Петропавловск). Два аэродрома (Красноярск и Чита) характеризуются низкой повторяемостью облаков нижнего яруса в течение всего года, так же как и Улан-Удэ, годовой ход для которого показан на рис. 3.

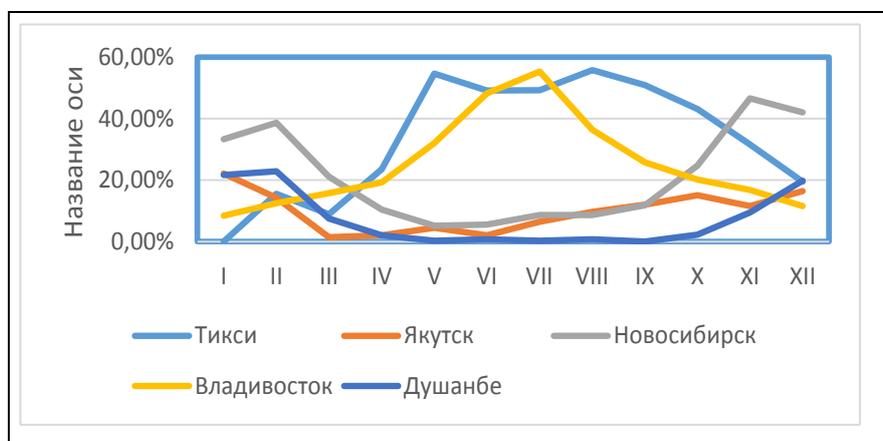


Рис. 2. Годовой ход повторяемости облаков с ВНГО ≤ 1500 м при их количестве ≥ 5 окт на аэродромах Тикси, Якутск, Новосибирск, Владивосток, Душанбе за период 2001–2018 гг.

Fig. 2. Annual cycle of occurrence frequency of clouds with ceiling height ≤ 1500 m and cloud amount ≥ 5 oct at the aerodromes of Tiksi, Yakutsk, Novosibirsk, Vladivostok, and Dushanbe, 2001-2018.

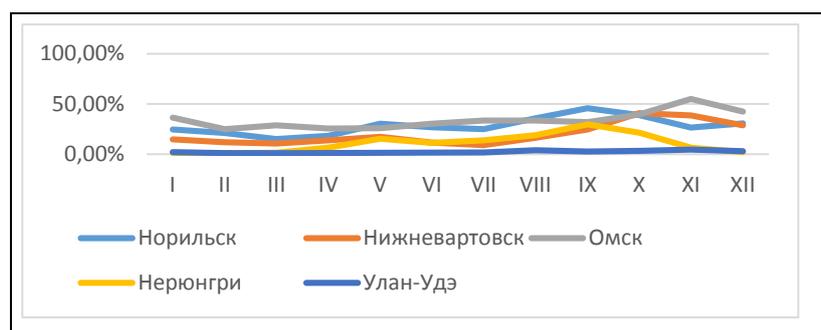


Рис. 3. Годовой ход повторяемости облаков с ВНГО ≤ 1500 м при их количестве ≥ 5 окт на аэродромах Норильск, Нижневартовск, Омск, Нерюнгри, Улан-Удэ за период 2001–2018 гг.

Fig. 3. As in Figure 2, but for the aerodromes of Norilsk, Nizhnevartovsk, Omsk, Neryungri, Ulan-Ude, 2001-2018.

Наиболее низкие ВНГО (не выше 90 м), прогноз которых наиболее важен с точки зрения обеспечения авиации, на многих аэродромах представляют собой очень редкое явление (повторяемость – доли процента, см. [4] и рис. 1). Даже в выборке за 13 лет с дискретностью 30 мин число случаев наблюдения такой низкой облачности на ряде аэродромов (Мирный, Екатеринбург, Чита, Павлодар) не составляет и 1000 случаев (при общем числе случаев наблюдений порядка 200 000). С другой стороны, на таких аэродромах, как Норильск, Якутск, Абакан, Братск, а в отдельные сезоны и на многих других, повторяемость таких низких облаков

увеличивается до нескольких процентов. Доля этой градации ВНГО особенно высока в Абакане (в среднем за год 68,8 %, а зимой 74,8 % от всех случаев ВНГО ≤ 1500 м при количестве облаков ≥ 5 окт).

Повторяемость низкой облачности зависит от направления ветра и от его скорости. Эти зависимости неодинаковы на разных аэродромах. Можно выделить три группы аэродромов в зависимости от преимущественных направлений ветра, при которых повторяемость низкой облачности повышена (рис. 4). К первой отнесем аэродромы, на которых повторяемость низкой облачности выше средней при ветрах южной четверти (SE, S, SW). Кроме показанных на рисунке Магадана, Владивостока и Барнаула, к этой группе можно отнести Новосибирск, Кемерово, Новокузнецк, Южно-Сахалинск, Петропавловск-Камчатский.



Рис. 4. Среднегодовые розы ветров (повторяемость, %) при наличии облаков с ВНГО ≤ 1500 м и при их количестве ≥ 5 окт на некоторых аэродромах азиатской части России и ближнего зарубежья за период 2001–2018 гг.

Fig. 4. Annual mean “wind roses” (occurrence frequency, %) under cloud amount ≥ 5 oct with ceiling height ≤ 1500 m at the aerodromes of (left panel) Magadan, Vladivostok, Barnaul, (middle panel) Polyarnnyy, Novyy Urengoy, Tyumen, (right panel) Astana, Karaganda, Dushanbe, 2001-2018.

Ко второй группе отнесем аэродромы, на которых низкая облачность чаще наблюдается при ветрах северной четверти (NW, N, NE). На рисунке показаны розы ветров для трех аэродромов этой группы – Полярного, Нового Уренгоя, Тюмени. Сюда же следует отнести Тикси, Мирный, Екатеринбург, Костанай, Николаевск, Хабаровск, Ош.

Далее, низкая облачность чаще наблюдается при ветрах западной четверти (SW, W, NW) на всех среднеазиатских аэродромах, а также в Норильске и Нерюнгри.

Наконец, есть ряд аэродромов, на которых не обнаруживается заметной зависимости повторяемости низкой облачности от направления ветра (Сургут, Нижневартовск, Якутск, Омск, Абакан, Братск, Чита, Улан-Удэ).

Отметим также, что на всех аэродромах наблюдается повышенная повторяемость (в 1,5–2,5 раза выше средней) низкой облачности при слабых ветрах переменных направлений и при штилях. Особенно сильно повышена (в 3–4 раза) повторяемость низкой облачности при таких условиях в Абакане, Братске, Оше, Кзыл-Орде. Эта особенность режима низкой облачности хорошо видна и на рис. 5, где даны распределения повторяемости низкой облачности по интервалам скоростей ветра. С другой стороны, на ряде аэродромов отмечается высокая повторяемость низких облаков при сильных (>8 м/с) ветрах. Кроме показанных на рисунке Магадана и Омска, эта особенность хорошо выражена на аэродромах Норильск, Сургут, Полярный, Барнаул, Новокузнецк, Николаевск, Южно-Сахалинск, Астана, Караганда.

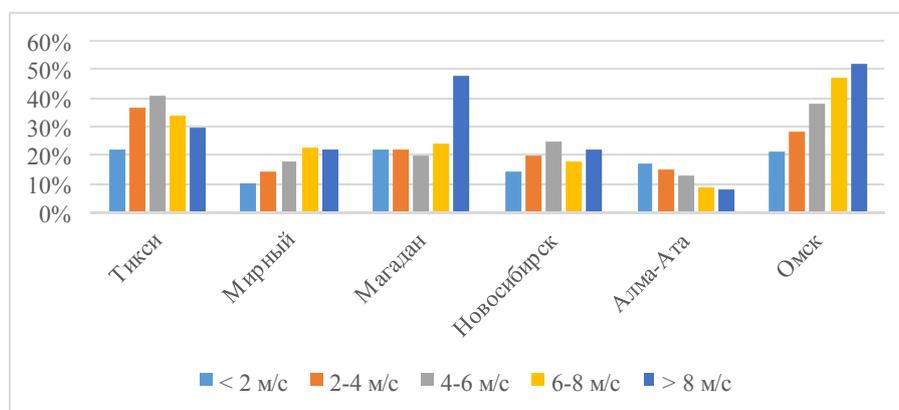


Рис. 5. Повторяемость облаков с ВНГО ≤ 1500 м при их количестве ≥ 5 окт при различных скоростях ветра на аэродромах за период 2001–2018 гг.

Fig. 5. Occurrence frequency of cloud ceiling height ≤ 1500 m and amount ≥ 5 oct under different wind speeds (m/s) at the aerodromes of Tiksi, Mirnyy, Magadan, Novosibirsk, Alma-Ata, and Omsk, 2001-2018.

Повторяемость низкой облачности сильно зависит от относительной влажности на аэродроме, так что для большей части аэродромов можно указать пороговое значение относительной влажности, ниже которого низкая облачность маловероятна. Эта зависимость, как и другие отмеченные выше, использована при разработке методов прогноза ВНГО.

Мировой опыт [6–8] говорит о том, что в рамках краткосрочного (на 12, 24, 30 ч) прогноза детализация ВНГО в слое нижних 300 м на данном этапе неэффективна. С учетом этого, в качестве предиктанта в условиях нашей задачи целесообразно использовать низкую облачность в количестве ≥ 5 окт при нижней границе ниже определенного предела. Первоначально рассматривались варианты ВНГО ≤ 300 , ≤ 200 и ≤ 100 м. Однако после первых оценок наличия и надежности статистических связей между предикторами и предиктантами было установлено, что только

один из предполагаемых предиктантов может быть рассчитан с практически значимой успешностью по имеющимся данным: наличие облачности ≥ 5 окт с ВНГО ≤ 300 м. Такой же вывод был получен нами ранее [1, 3] при выполнении аналогичной разработки для европейской России.

Прогностические модельные данные о температуре, влажности и ветре позволяют оценить наличие статистических связей не только приземных условий, но и стратификации атмосферы в пограничном слое с характеристиками низкой облачности. Для таких оценок был применен дискриминантный анализ и выделена та же группа потенциальных предикторов явления (в данном случае облачности в заданном количестве и с нижней границей в заданных пределах), которая ранее использовалась для аналогичного анализа по европейской части России [3]:

1. RH_{1000} – относительная влажность на поверхности 1000 гПа;
2. RH_{925} – относительная влажность на поверхности 925 гПа;
3. RH_{850} – относительная влажность на поверхности 850 гПа;
4. γ_{1000}^{925} – вертикальный градиент температуры в слое 1000–925 гПа;
5. γ_{925}^{850} – вертикальный градиент температуры в слое 925–850 гПа;
6. γ_{850}^{700} – вертикальный градиент температуры в слое 850–700 гПа;
7. V_{1000} – скорость ветра на поверхности 1000 гПа;
8. V_{925} – скорость ветра на поверхности 925 гПа;
9. V_{850} – скорость ветра на поверхности 850 гПа;
10. CL – модельный балл облачности на нижних уровнях (в баллах с десятичными долями);
11. $T_d 1000$ – температура на поверхности 1000 гПа;
12. $(T - T_d)_{1000}$ – дефицит точки росы на поверхности 1000 гПа.

Переходя непосредственно к задаче получения метода прогноза сформулированного выше предиктанта (высоты ее нижней границы ≤ 300 м по аэродромам при количестве облаков ≥ 5 окт), укажем объемы выборок данных, сформированных для решения этой задачи:

(1) Прогнозы на 12 и 24 ч давления, геопотенциала, температуры, влажности, ветра и количества облаков нижнего яруса (т. е. наличия облачности в слое от земли до 800 гПа) и объективные анализы по модели COSMO-Ru7 за период с 10.02.2014 до 31.12.2018 в узлах сетки, наиболее близко расположенных к 7 аэродромам, находящихся как в области расчета COSMO-Ru7, так и в области расчета COSMO-Ru13 (Новый Уренгой, Сургут, Нижневартовск, Тюмень, Екатеринбург, Челябинск, Омск).

(2) Прогнозы тех же величин и с теми же заблаговременностями по модели COSMO-Ru13 и начальные поля модели с 10.02.2014 по 31.12.2018 в узлах модельной сетки, наиболее близко расположенных ко всем аэродромам, для которых имеются данные о ВНГО из телеграмм METAR.

(3) Данные телеграмм METAR для вышеперечисленных аэродромов за тот же период.

Выборки (1) и (2) были разбиты на две части, первая из которых (10.02.2014 – 31.12.2016) рассматривалась как обучающая, вторая (1.01.2017 – 31.12.2018) – как независимая.

Как первое приближение к задаче краткосрочного прогноза ВНГО, нами была рассмотрена возможность расчета этой величины по прогностическим данным о влажности. Опираясь на опыт [1, 3], в качестве единственного предиктора ВНГО был использован дефицит точки росы на нижнем уровне и отыскивалось выражение типа формулы Е.С. Селезневой [5]:

$$\text{ВНГО} = C (T - T_d). \quad (1)$$

Коэффициент в (1) подбирался в данном случае как значение, обеспечивающее наибольшую успешность попадания расчетного ВНГО в ту же градацию, в которой находится измеренная величина ВНГО. Вместо (1) получаем тогда следующее решающее правило:

$$\text{ВНГО} \leq 300 \text{ м при } (T - T_d) \leq (T - T_d)_n. \quad (2)$$

ВНГО будет ниже 300 м, если дефицит точки росы на нижнем уровне, т. е. в данном случае на поверхности 1000 гПа в ближайшем узле модельной сетки, меньше своего порогового значения, определенного статистически по обучающей выборке. Надо сказать, что метод пороговых значений широко применяется в авиационном прогнозе [6–8]. Расчеты показали (таблица не приводится), что успешность таким образом сформулированного решающего правила на многих аэродромах достаточно высока. Мы применяли это правило наряду с дискриминантным анализом и для каждого аэродрома отбирали ту статистическую зависимость, которая обеспечивала более высокие значения критериев успешности и надежности разделения случаев наличия и отсутствия предиктанта.

По выборкам (2), первая часть, и (3) был выполнен линейный дискриминантный анализ и определены решающие правила типа (2). Такие же расчеты были проведены для тех же 7 аэродромов по выборке (1), первая часть, и по выборке (3). Сравнение результатов обоих вариантов расчета позволило получить определенное представление о сходстве и различии моделей COSMO-Ru7 и COSMO-Ru13 в отношении успешности прогнозирования полей влажности, а также температуры и ветра.

Оказалось, что хотя в двух версиях модели горизонтальное разрешение различается практически вдвое, успешность разделения случаев наличия и отсутствия облачности с $\text{ВНГО} \leq 300$ м мало отличается, судя по критериям Пирса – Обухова и Хайдке – Багрова. Возможно, причиной этого является редкая сеть наблюдений в этом районе, так что уменьшение шага сетки практически не повышает информативности модели о структуре атмосферных полей. В обоих вариантах расчеты с помощью порогового дефицита точки росы обеспечили практически значимые величины PI по всем 7 аэродромам, причем оправдываемость прогноза наличия явления значительно превышает его выборочную повторяемость, а предупреденность наличия явления в среднем по 7 аэродромам

составляет 78,8 %. Дискриминантный анализ обеспечил такие же в среднем характеристики успешности (при заметно более высокой предупреденности наличия явления). Отметим, что предиктор 10 вошел в 5 из 7 дискриминантных функций. Вместе с тем отметим, что пороговые значения дефицита точки росы по 7 аэродромам, для которых имеется прогноз по обеим версиям модели, не всегда совпадают. Дискриминантные функции также заметно различаются.

Следующим шагом были расчеты по всем аэродромам с предикторами из выборки (2), т. е. из прогностических полей COSMO-Ru13. По первой части выборки (2), использованной как обучающая, получены решающие правила для двух заблаговременностей (табл. 1 и 2).

Из табл. 1 видно, что при заблаговременности 12 ч высокие PI получают на всех аэродромах, а удовлетворительные HI ($\geq 0,20$) – на 11 российских и 9 аэродромах ближнего зарубежья, т. е. бывших советских республик Средней Азии (эти 20 аэродромов выделены в таблице жирным шрифтом). Разделяющие правила для остальных 21 аэродрома не обеспечивают практически значимой надежности прогноза с помощью предикторов из COSMO-Ru13 (низкая оправдываемость прогноза наличия явления, хотя предупреденность высокая). Заметим, что по всем аэродромам, на которых повторяемость явления $>10\%$, разделяющие правила практически значимы, а в некоторых случаях практически значимые правила получены и при более низкой повторяемости (таковы аэродромы Якутск, Кемерово, Хабаровск, Владивосток и все аэродромы ближнего зарубежья, кроме Костаная и Астаны). Для 6 аэродромов (Новый Уренгой, Нижневартовск, Кемерово, Владивосток, а также Душанбе и Худжанд) практически значимое разделение получено по пороговому значению единственного предиктора – дефицита точки росы на поверхности 1000 гПа. В 7 решающих правилах участвуют два предиктора: относительная влажность, дефицит точки росы и температура на поверхности 1000 гПа, а также модельный балл облачности и в одном случае – относительная влажность на поверхности 925 гПа (в Бишкеке, расположенном в предгорьях). Наконец, в 6 остальных практически значимых решающих правилах участвуют три предиктора. Хотя на зависимой выборке эти правила обеспечивают значимую надежность, однако можно полагать из общих соображений, что на независимых данных именно эти правила могут показать худший результат.

Прогноз на 24 ч по зависимой выборке (табл. 2) в целом близок по показателям успешности к прогнозу на 12 ч, с тем же (кроме Кемерово) набором аэродромов, для которых $HI \geq 0,20$, но с несколько отличающимися комбинациями аргументов решающих правил. Наиболее информативными остаются относительная влажность на поверхности 1000 гПа (в качестве первого предиктора) и модельный балл облачности (в качестве третьего, реже второго предиктора). Стратификация температуры в слоях 1000–925 и 925–850 также достаточно часто входит в число предикторов

как в табл. 1, так и в табл. 2, чаще в виде второго предиктора. То же относится к скоростям ветра на поверхностях 1000 и 925 гПа. Намного реже проявляется связь ВНГО с характеристиками полей влажности, температуры и ветра на поверхности 850 гПа.

Таблица 1. Результаты расчета ВНГО по прогностическим данным модели COSMO-Ru13 с заблаговременностью 12 ч по зависимой выборке
Table 1. Calculation of ceiling height from the COSMO-Ru13 output data with 12 h projection on the dependent sample

10.02.2014 – 31.12.2016, 0, 6, 12, 18 ч COSMO-Ru13, прогноз на 12 ч							
Аэродромы	Число случаев общее	Повтор. явления	Предикторы	λ , %	ϕ , %	PI	NI
Новый Уренгой	3179	12.0	12	28.2	72.2	0.47	0.28
Сургут	3480	13.2	1,2,4	26.8	81.7	0.48	0.26
Нижневартовск	3404	12.1	12	28.9	68.4	0.45	0.29
Мирный	2982	6.9	1,2	14.7	80.5	0.46	0.15
Якутск	3161	5.5	11,12	27.5	67.2	0.57	0.34
Магадан	3376	13.2	1,4,5	37.0	88.8	0.66	0.41
Тюмень	3011	11.7	1,2	26.1	91.5	0.57	0.27
Екатеринбург	3250	5.9	1,2,9	13.7	86.0	0.52	0.15
Челябинск	2756	10.4	1,10	25.4	84.0	0.55	0.27
Омск	3222	14.3	1,2,10	33.6	87.8	0.59	0.35
Красноярск	2778	2.0	12	8.8	74.5	0.59	0.13
Новосибирск	3161	5.5	1,2,7	13.4	89.1	0.56	0.15
Кемерово	2875	6.8	12	21.6	74.0	0.54	0.26
Братск	2436	4.1	1,2,10	9.8	81.2	0.49	0.11
Иркутск	2953	3.9	1,3,8	8.5	80.0	0.45	0.09
Чита	3090	1.3	2,9	3.2	82.5	0.50	0.04
Хабаровск	3101	5.6	11,12	19.8	82.2	0.62	0.25
Владивосток	3352	9.8	12	27.3	85.3	0.61	0.31
Костанай	3228	10.1	1,10	30.0	84.4	0.62	0.34
Астана	3619	12.9	1,10	32.5	83.7	0.58	0.35
Караганда	3494	8.6	2,3,10	24.0	89.4	0.63	0.28
Павлодар	3244	2.8	1,9,10	10.0	82.2	0.61	0.14
Усть-Каменогорск	3428	6.8	2,3,10	14.9	66.4	0.39	0.15
Алма-Ата	3533	7.2	1,3,10	26.4	65.4	0.51	0.31
Кзыл-Орда	3396	6.6	1,9,10	28.1	80.3	0.66	0.35
Бишкек	2745	7.0	2,10	28.9	74.1	0.60	0.35
Худжанд	3591	4.6	12	23.2	81.1	0.68	0.31
Ош	3003	5.4	4,6,10	30.6	82.0	0.71	0.40
Душанбе	3252	4.4	12	26.8	79.2	0.70	0.36

Примечание. λ – оправдываемость прогноза наличия явления; ϕ – пре-
дупрежденность наличия явления; PI – критерий Пирса – Обухова;
NI – критерий Хайдке – Багрова.

Таблица 2. Результаты расчета ВНГО по прогностическим данным модели COSMO-Ru13 с заблаговременностью 24 ч по зависимой выборке
Table 2. Calculation of ceiling height from the COSMO-Ru13 output data with 24 h projection on the dependent sample

10.02.2014 – 31.12.2016, 0, 6, 12, 18 ч COSMO-Ru13, прогноз на 24 ч							
Аэродромы	Число случаев общее	Повтор. явления	Предикторы	λ , %	ϕ , %	PI	HI
Новый Уренгой	3186	12.1	12	24.2	78.2	0.45	0.23
Сургут	3488	13.2	12	28.1	66.9	0.41	0.26
Нижневартовск	3416	11.9	12	22.5	74.9	0.40	0.20
Мирный	2998	6.9	1,2,9	15.8	79.7	0.48	0.17
Якутск	3168	5.6	4,5,8	17.2	77.8	0.56	0.21
Магадан	3390	13.3	1,5,10	37.3	86.1	0.64	0.41
Тюмень	3021	11.6	1,3,10	26.0	88.6	0.56	0.27
Екатеринбург	3260	6.0	1,8,10	13.2	83.5	0.49	0.14
Челябинск	2765	10.3	1,10	23.9	84.3	0.53	0.25
Омск	3232	14.2	1,2,10	30.8	86.1	0.54	0.31
Красноярск	2792	1.9	1,2,8	5.3	85.2	0.55	0.07
Новосибирск	3174	5.3	1,2,10	12.1	88.0	0.53	0.13
Кемерово	2886	6.8	1,2,10	16.8	84.2	0.54	0.19
Братск	2449	4.2	2,4,10	9.3	78.4	0.45	0.10
Иркутск	2959	3.9	1,3,8	8.3	77.2	0.43	0.09
Чита	3106	1.3	1,9	3.0	87.5	0.51	0.03
Хабаровск	3113	5.7	11,12	21.2	66.5	0.52	0.26
Владивосток	3355	9.7	12	28.3	77.5	0.56	0.32
Костанай	3238	9.9	1,2,10	27.3	87.3	0.62	0.31
Астана	3630	13.0	2,5,10	32.4	84.5	0.58	0.35
Караганда	3510	8.7	2,10	23.4	86.6	0.59	0.27
Павлодар	3250	2.8	5,8,10	10.2	82.6	0.61	0.14
Усть-Каменогорск	3448	6.8	2,4,8	16.7	81.4	0.52	0.18
Алма-Ата	3549	7.2	2,3,10	23.3	80.7	0.60	0.28
Кзыл-Орда	3408	6.5	1,10	25.0	76.1	0.60	0.31
Бишкек	2753	7.4	2,6,10	26.3	73.4	0.57	0.31
Худжанд	3603	4.6	12	23.2	85.5	0.72	0.32
Ош	3008	5.6	12	27.8	79.0	0.67	0.36
Душанбе	3262	4.6	12	28.9	79.3	0.70	0.38

Примечание. λ – оправдываемость прогноза наличия явления; ϕ – предупредительность наличия явления; PI – критерий Пирса – Обухова; HI – критерий Хайдке – Багрова.

На независимой выборке данных (табл. 3 и 4) получены результаты, несколько (но не намного) худшие, чем на зависимой. Так, сравнивая табл. 1 и 3, видим, что $HI \geq 0,20$ в табл. 3 получены для 19 аэродромов (в Якутске на независимой выборке оказалось $HI = 0,18$), тогда как PI получено вполне значимым для всех аэродромов.

Таблица 3. Результаты расчета ВНГО по прогностическим данным модели COSMO-Ru13 с заблаговременностью 12 ч по независимой выборке
Table 3. Calculation of ceiling height from the COSMO-Ru13 output data with 12 h projection for the independent sample

1.01.2017 – 31.12.2018, 0, 6, 12, 18 ч COSMO-Ru13, прогноз на 12 ч							
Аэродромы	Число случаев общее	Повтор. явления	Предикторы	λ , %	ϕ , %	PI	HI
Новый Уренгой	2313	12.9	12	27.8	66.2	0.41	0.26
Сургут	2467	11.2	1,2,4	23.4	82.6	0.49	0.23
Нижневартовск	2563	10.7	12	30.5	80.2	0.58	0.34
Мирный	2438	7.3	1,2	16.8	80.8	0.50	0.18
Якутск	2312	6.4	11,12	17.5	49.7	0.34	0.18
Магадан	2460	11.3	1,4,5	32.1	82.7	0.61	0.36
Тюмень	2330	11.8	1,2	26.8	77.4	0.49	0.27
Екатеринбург	2275	5.8	1,2,9	14.7	74.4	0.48	0.16
Челябинск	1883	9.5	1,10	28.0	84.8	0.62	0.33
Омск	2415	14.2	1,2,10	36.3	81.9	0.58	0.38
Красноярск	1778	2.0	12	7.4	68.6	0.51	0.10
Новосибирск	2396	7.1	1,2,7	15.5	73.1	0.42	0.16
Кемерово	2209	6.8	12	18.7	68.2	0.46	0.21
Братск	1570	3.4	1,2,10	9.9	83.3	0.56	0.12
Иркутск	2028	2.6	1,3,8	6.5	78.8	0.49	0.08
Чита	1944	0.6	2,9	1.6	75.0	0.47	0.02
Хабаровск	2219	5.3	11,12	22.9	75.4	0.61	0.29
Владивосток	2506	7.5	12	24.6	83.5	0.63	0.30
Костанай	2199	9.7	1,10	28.0	70.4	0.51	0.30
Астана	2788	12.3	1,10	31.1	81.1	0.56	0.33
Караганда	2342	9.7	2,3,10	26.3	80.6	0.56	0.29
Павлодар	2284	3.7	1,9,10	13.1	75.3	0.56	0.17
Усть-Каменогорск	2645	6.9	2,3,10	13.6	59.6	0.32	0.13
Алма-Ата	2790	11.2	1,3,10	34.3	67.0	0.51	0.36
Кзыл-Орда	2572	8.0	1,9,10	32.6	80.6	0.66	0.40
Бишкек	1554	10.8	2,10	41.3	60.7	0.50	0.42
Худжанд	2434	4.4	12	23.5	72.9	0.62	0.31
Ош	2642	5.3	4,6,10	29.4	61.7	0.53	0.35
Душанбе	2549	3.1	12	23.5	83.3	0.75	0.33

Примечание. λ – оправдываемость прогноза наличия явления; ϕ – предупредительность наличия явления; PI – критерий Пирса – Обухова; HI – критерий Хайдке – Багрова.

Сравнивая табл. 2 и 4, замечаем, что при заблаговременности 24 ч на независимой выборке получено $HI \geq 0,20$ на 18 аэродромах, но в Новом Уренгое и в Якутске критерий HI получен несколько ниже 0,20, зато в Мирном $HI = 0,21$, тогда как на зависимой выборке было $HI = 0,17$. Таким образом, условие значимости HI выполняется для 16 аэродромов из тех

же, что и в зависимой выборке. В целом можно считать найденные на зависимой выборке прогностические соотношения для этих аэродромов достаточно устойчивыми, поскольку авторские испытания (расчеты на независимой выборке) их подтверждают.

Таблица 4. Результаты расчета ВНГО по прогностическим данным модели COSMO-Ru13 с заблаговременностью 24 ч по независимой выборке
Table 4. Calculation of ceiling height from the COSMO-Ru13 output data with 24 h projection for the independent sample

1.01.2017 – 31.12.2018, 0, 6, 12, 18 ч COSMO-Ru13, прогноз на 24 ч							
Аэродромы	Число случаев общее	Повтор. явления	Предикторы	λ (%)	ϕ (%)	PI	HI
Новый Уренгой	2299	12.7	12	22.8	73.6	0.37	0.19
Сургут	2449	11.4	12	23.8	69.4	0.41	0.22
Нижневартовск	2547	10.8	12	24.2	83.2	0.52	0.25
Мирный	2422	7.3	1,2,9	18.7	78.7	0.52	0.21
Якутск	2304	6.3	4,5,8	11.9	60.3	0.30	0.10
Магадан	2444	11.3	1,5,10	32.3	82.6	0.61	0.36
Тюмень	2313	11.8	1,3,10	23.8	70.1	0.40	0.22
Екатеринбург	2269	5.8	1,8,10	14.0	79.5	0.49	0.15
Челябинск	1868	9.2	1,10	26.0	87.8	0.66	0.30
Омск	2395	14.1	1,2,10	33.6	84.0	0.57	0.35
Красноярск	1768	2.0	1,2,8	5.4	77.1	0.50	0.07
Новосибирск	2377	7.2	1,2,10	15.4	80.7	0.46	0.16
Кемерово	2197	6.6	1,2,10	15.5	79.5	0.49	0.17
Братск	1573	3.2	2,4,10	7.9	86.0	0.53	0.09
Иркутск	2018	2.6	1,3,8	5.8	71.2	0.40	0.06
Чита	1930	0.6	1,9	1.3	66.7	0.34	0.01
Хабаровск	2204	5.6	11,12	23.4	58.5	0.47	0.28
Владивосток	2486	7.6	12	27.7	75.0	0.59	0.33
Костанай	2192	9.8	1,2,10	26.5	71.0	0.50	0.28
Астана	2772	12.4	2,5,10	30.5	83.1	0.56	0.32
Караганда	2338	9.7	2,10	25.7	79.6	0.55	0.28
Павлодар	2272	3.8	5,8,10	11.6	82.8	0.58	0.15
Усть-Каменогорск	2630	6.9	2,4,8	14.1	89.0	0.49	0.14
Алма-Ата	2777	11.3	2,3,10	32.6	85.1	0.63	0.37
Кзыл-Орда	2557	8.1	1,10	27.4	72.8	0.56	0.32
Бишкек	1552	11.2	2,6,10	35.6	60.9	0.47	0.36
Худжанд	2424	4.4	12	24.3	77.6	0.66	0.33
Ош	2625	5.3	12	24.5	61.4	0.51	0.30
Душанбе	2532	3.1	12	20.9	70.5	0.62	0.29

Примечание. λ – оправдываемость прогноза наличия явления; ϕ – пре-
дупрежденность наличия явления; PI – критерий Пирса – Обухова; HI –
критерий Хайдке – Багрова.

Из представленных результатов заключаем, что модельные прогнозы влажности и температуры, а также стратификации и скорости ветра в нижней тропосфере достаточно успешны для того, чтобы на их основании прогнозировать наличие низкой облачности в количестве ≥ 5 окт с нижней границей не выше 300 м с заблаговременностью 12 и 24 ч соответственно на 19 и 16 аэродромах азиатской части России и ближнего зарубежья. Решающие правила в явном виде представлены в табл. 5 и 6. (Подчеркнем, что значения предикторов берутся в узле сетки COSMO-Ru13, ближайшем к аэродрому, в соответствии с требованиями ВМО [2].) Наличие явления, т. е. низкой облачности с указанными характеристиками, следует ожидать, если выполняются неравенства, указанные в таблицах.

Таблица 5. Решающие правила для прогноза на 12 ч ВНГО ≤ 300 м при количестве облаков ≥ 5 окт

Table 5. Decision rules for 12 h forecasting of ceiling height ≤ 300 m with cloud amount ≥ 5 oct with the model output data as predictors

	Аэродромы	Решающие правила при прогнозе на 12 ч
1	Новый Уренгой	$(T - T_d)_{1000} \leq 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$
2	Сургут	$L = 0,034 RH_{1000} + 0,03 RH_{925} - 0,728 \gamma_{1000}^{925} - 5,299 > 0$
3	Нижневартовск	$(T - T_d)_{1000} \leq 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$
4	Мирный	$L = 0,04 RH_{1000} + 0,04 RH_{925} - 6,477 > 0$
5	Магадан	$L = 0,144 RH_{1000} + 1,003 \gamma_{1000}^{925} - 1,036 \gamma_{925}^{850} - 12,373 > 0$
6	Тюмень	$L = 0,045 RH_{1000} + 0,021 RH_{850} - 5,283 > 0$
7	Челябинск	$L = 0,037 RH_{1000} + 0,23 CL - 4,249 > 0$
8	Омск	$L = 0,038 RH_{1000} + 0,026 RH_{925} + 0,01 CL - 5,533 > 0$
9	Кемерово	$(T - T_d)_{1000} \leq 1,8 \text{ } ^\circ\text{C}$
10	Хабаровск	$(T - T_d)_{1000} \leq 2,5 \text{ } ^\circ\text{C}; -10 \leq T \leq 20 \text{ } ^\circ\text{C};$
11	Владивосток	$(T - T_d)_{1000} \leq 2,2 \text{ } ^\circ\text{C}$
12	Костанай	$L = 0,039 RH_{1000} + 0,309 CL - 4,709 > 0$
13	Астана	$L = 0,043 RH_{925} + 0,233 CL - 4,667 > 0$
14	Караганда	$L = 0,05 RH_{925} - 0,015 RH_{850} + 0,196 CL - 3,772 > 0$
15	Алма-Ата	$L = 0,063 RH_{1000} - 0,044 RH_{850} + 0,428 CL - 3,824 > 0$
16	Кзыл-Орда	$L = 0,056 RH_{1000} - 0,028 V_{850} + 0,327 CL - 4,511 > 0$
17	Бишкек	$L = 0,048 RH_{925} + 0,358 CL - 4,802 > 0$
18	Ош	$L = 5,451(\gamma_{1000}^{925} - \gamma_{850}^{700}) + 0,685 CL - 3,796 > 0$
19	Душанбе	$(T - T_d)_{1000} \leq 2,2 \text{ } ^\circ\text{C}$

Примечание. T – прогностические значения температуры; T_d – точки росы; RH – относительной влажности; γ – градиента температуры в слое; V – скорости ветра; CL – модельного балла низкой облачности.

Таблица 6. То же, что в таблице 5, но для прогноза на 24 ч
Table 6. As in Table 5, but for 24 h projection

	Аэродромы	Решающие правила при прогнозе на 24 ч
1	Сургут	$(T - T_d)_{1000} \leq 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$
2	Нижневартовск	$(T - T_d)_{1000} \leq 1,8 \text{ } ^\circ\text{C}$
3	Магадан	$L = 0,116 RH_{1000} - 1,132 \gamma_{925}^{850} + 0,131 CL - 10,482 > 0$
4	Тюмень	$L = 0,029 RH_{1000} + 0,023 RH_{850} + 0,117 CL - 4,853 > 0$
5	Челябинск	$L = 0,031 RH_{1000} + 0,217 CL - 3,814 > 0$
6	Омск	$L = 0,028 RH_{1000} + 0,016 RH_{925} + 0,131 CL - 4,263 > 0$
7	Хабаровск	$0,5 \leq (T - T_d)_{1000} \leq 2,0 \text{ } ^\circ\text{C}; -10 \leq T \leq 20 \text{ } ^\circ\text{C}$
8	Владивосток	$(T - T_d)_{1000} \leq 1,8 \text{ } ^\circ\text{C}$
9	Костанай	$L = 0,023 RH_{1000} + 0,034 RH_{925} + 0,175 CL - 5,275 > 0$
10	Астана	$L = 0,041 RH_{925} - 1,106 \gamma_{925}^{850} + 0,118 CL - 3,288 > 0$
11	Караганда	$L = 0,044 RH_{925} + 0,143 CL - 4,085 > 0$
12	Алма-Ата	$L = 0,106 RH_{925} - 0,063 RH_{850} + 0,241 CL - 4,149 > 0$
13	Кзыл-Орда	$L = 0,054 RH_{1000} + 0,306 CL - 4,577 > 0$
14	Бишкек	$L = 0,04 RH_{925} - 2,912 \gamma_{850}^{700} + 0,251 CL - 2,231 > 0$
15	Ош	$(T - T_d)_{1000} \leq 2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$
16	Душанбе	$(T - T_d)_{1000} \leq 2,2 \text{ } ^\circ\text{C}$

Примечание. T – прогностические значения температуры; T_d – точки росы; RH – относительной влажности; γ – градиента температуры в слое; V – скорости ветра; CL – модельного балла низкой облачности.

Таким образом, на материале аэродромных наблюдений и прогностических данных модели COSMO-Ru13 нами разработаны методом пост-процессинга статистические соотношения (решающие правила), позволяющие прогнозировать наличие облачности ≥ 5 окт с ВНГО ≤ 300 м с заблаговременностью 12 и 24 ч на 19 и 16 аэродромах азиатской территории России и ближнего зарубежья соответственно с практически значимой успешностью и надежностью, используя в качестве предикторов прогностическую продукцию указанной модели.

Для остальных аэродромов, представленных в табл. 3–4, по результатам расчетов на независимой выборке заключаем, что дискриминантные функции, аргументы которых приведены в таблицах, не следует рекомендовать для практического применения: прогноз будет мало надежен из-за большого количества ложных тревог. Это объясняется отчасти низкой повторяемостью явления, а отчасти тем, что данная версия модели COSMO, с присущими ей геометрией, информационным и физическим наполнением, не описывает с должной точностью особенностей атмосферных полей в окрестностях этих аэродромов.

Облачность с более низкой нижней границей (ниже 300 м), представляющая собой редкое явление, на данном этапе развития численных моделей атмосферы не удается прогнозировать с такой заблаговременностью. В лучших мировых прогностических центрах прогноз низких облаков с наиболее практически значимыми ВНГО (60, 90, 120 м) не дается на 12 или 24 ч: это область наукастинга, и такие прогнозы даются специальными методами [8–10] с заблаговременностью от 15 мин до 6 ч.

Список литературы

1. *Ветрова Е.И., Скриптунова Е.Н., Шакина Н.П.* Режим низкой облачности и ее прогноз на аэродромах европейской территории бывшего СССР // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 1. С. 12-31.
2. Наставление по глобальной системе обработки данных и прогнозирования: Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО // ВМО-№ 485. 2018. 134 с.
3. Отчет о НИР: 1.4.1. Совершенствование методов и технологий авиационных прогнозов (заключительный). № гос. регистрации 01200850847. М., 2010. 144 с.
4. Отчет о НИР: 1.1.4.1. Развитие методов и технологий авиационных прогнозов для нижних эшелонов полета (заключительный). № гос. регистрации 01201166561. М., 2013. 107 с.
5. *Селезнева Е.С.* О высоте нижней границы внутримассовых облаков // *Труды ГГО*. 1956. Вып. 63 (125). С. 22-31.
6. *Шакина Н.П., Иванова А.Р.* Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: Триада лтд, 2016. 310 с.
7. *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.
8. *Leyton S.M., Fritch J.M.* The impact of high-frequency weather observations on short-term probabilistic forecasts of ceiling and visibility // *Wea. Forecast*. 2004. Vol. 19, no. 1. P. 145-157.
9. *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.
10. *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. Forecas*. 2009. Vol. 24, no. 6. P. 1511-1523.

References

1. *Vetrova E.I., Skriptunova E.N., Shakina N.P.* Low clouds and their forecast at the airports of the European part of the former USSR. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, vol. 38, no. 1, pp. 6–19. DOI: 10.3103/S1068373913010020.
2. Manual on the Global Data-processing and Forecasting System. Annex IV to the WMO Technical Regulations. *WMO-No. 485*. Geneva, WMO, 2018, 134 p.
3. Otchet o NIR: 1.4.1. Sovershenstvovanie metodov i tekhnologij aviacionnyh prognozov (zaklyuchitel'nyj). Gos. registraciya No. 01200850847. Moscow, 2010, 144 p. [in Russ.].
4. Otchet o NIR: 1.1.4.1. Razvitie metodov i tekhnologij aviacionnyh prognozov dlya nizhnih eshelonov poleta (zaklyuchitel'nyj). Gos. Registraciya No. 01201166561. M., 2013. 107 p. [in Russ.].
5. *Selezneva E.S.* O vysote nizhnej granicy vnutrimassovyh oblakov. *Trudy GGO*, 1956, vol. 63, no. 125, pp. 22-31. [in Russ.].
6. *Shakina N.P., Ivanova A.R.* Weather forecasting for aviation. Moscow, Triada LTD publ., 2016, 310 p. [in Russ.].

7. 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, pp. 627-646.

8. Leyton S.M., Fritch J.M. The impact of high-frequency weather observations on short-term probabilistic forecasts of ceiling and visibility. *Wea. Forecast.*, 2004, vol. 19, no. 1, pp. 145-157.

9. 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, pp. 3072-3088.

10. 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. 6, pp. 1511-1523.

Поступила в редакцию 16.03.2019 г.

Received by the editor 16.03.2019.