

УДК 551.547.2

*Е.М. Связов, А.С. Глотова***ПРОГНОЗ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ, ПРИВЕДЕННОГО К УРОВНЮ МОРЯ ПО СТАНДАРТНОЙ АТМОСФЕРЕ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ФАКТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИЗЕМНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ**

Проведена оценка точности прогноза давления, приведенного к уровню моря по стандартной атмосфере, а также предложен метод восстановления его фактических значений по данным наземной метеорологической сети станций. В качестве исходных данных были использованы результаты счета приведенного давления с помощью численных моделей прогноза погоды WRF-ARW, GEM и GFS. Выявлено, что по этим численным моделям можно с достаточной степенью точности рассчитывать минимальные значения приведенного по стандартной атмосфере давления для их включения в прогнозы погоды для авиации. Установлено, что наилучшие результаты при прогнозе показала модель GFS, а с учетом более детальной пространственной сетки прогноза – WRF-ARW. Показано, что перевод фактического давления, приведенного к уровню моря по реальной атмосфере, в давление, приведенное по стандартной атмосфере, с использованием синоптических карт является качественной альтернативой при отсутствии численного прогноза барического поля.

Ключевые слова: давление, приведенное к уровню моря по стандартной атмосфере; численные модели прогноза погоды; средняя абсолютная ошибка прогноза; прогнозы погоды для авиации; заблаговременность прогноза.

В настоящее время при выполнении полетов гражданских судов в воздушном пространстве Российской Федерации используется давление, приведенное к среднему уровню моря по международной стандартной атмосфере, обозначаемое как QNH [1-3]. В соответствии с нормативными документами в авиационные прогнозы погоды в формате GAMET, предназначенные для полетов воздушных судов на нижних эшелонах, включаются прогностические минимальные значения QNH в пределах района Единой системы организации воздушного движения [4].

В стандартной атмосфере принимаются следующие условия: давление воздуха на среднем уровне моря при температуре $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ равно 1013 гПа (760 мм рт. ст.), вертикальный градиент температуры равен $0,0065\text{ }^{\circ}\text{C/м}$ до высоты 11 км (условная высота нижней границы тропопаузы), выше 11 км температура воздуха не меняется, то есть вертикальный термический градиент составляет 0°C/м [5].

Прогнозирование давления для авиации является достаточно сложным, так как на данный момент современные модели имеют определенную погрешность. Достаточно интересным является сравнение нескольких моделей прогноза погоды и определение возможности их использования для прогнозирования QNH .

Целью настоящей работы является оценка точности прогноза давления, приведенного к уровню моря по стандартной атмосфере, с использованием моделей GFS, WRF-ARW и GEM [6], а также оценка точности восстановления фактических значений QNH по данным наземной метеорологической сети станций.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных данных были использованы результаты расчета метеорологических величин с помощью численных моделей прогноза погоды WRF-ARW, GEM и GFS на период 48 ч с шагом по времени 3 ч . Пространственное разрешение моделей было следующим: WRF-ARW – 10 км , GFS – $0,5^{\circ}$, GEM – 25 км . Вычисления, обработка и графические построения производились с использованием программного комплекса GrADS, а также Microsoft Excel.

Принято считать, что температура воздуха в стандартной атмосфере изменяется линейно, поэтому такую атмосферу можно считать политропной. Таким образом, для вычисления приведенного давления справедливо следующее выражение:

$$P_{QNH} = P_z \left(1 - \frac{\gamma}{T_0} z\right)^{\frac{g}{R\gamma}}. \quad (1)$$

Здесь $R = 287,05 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ – удельная газовая постоянная сухого воздуха; P_z – давление на уровне станции (или приведенное к порогу взлетно-посадочной полосы (ВПП) [1, 2]), гПа ; $\gamma = 0,0065^\circ\text{C}/\text{м}$ вертикальный градиент температуры воздуха; z – высота станции (порога ВПП) над уровнем моря, м ; $g = 9,80665 \text{ м}/\text{с}^2$ – ускорение свободного падения; $T_0 = 288,15 \text{ К}$ – температура на уровне моря в стандартной атмосфере.

Величина P_{QNH} зависит от высоты станции и от измеренного на ней давления. Если рассматривать конкретную станцию, то приведенное давление будет зависеть только от атмосферного давления, измеренного на ней. Зная давление на высоте станции, найдем QNH . Для этого упростим выражение (1), подставив константы, в результате получим:

$$P_{QNH} = P_z(1 - 2,279502 \cdot 10^{-5} \cdot z)^{-5,25587981271}. \quad (2)$$

Для того чтобы оценить точность расчета P_{QNH} были использованы результаты численного моделирования атмосферного давления, переведенного с помощью выражения (2) в значения QNH , и фактические значения атмосферного давления, зафиксированные на аэродроме Пермь (Большое Савино). По значениям этих величин рассчитывалась средняя абсолютная ошибка прогноза приведенного давления. Исходя из требований нормативных документов [1; 4], прогноз P_{QNH} считается оправданным, если величина абсолютной погрешности не превышает значения 1 гПа .

Результаты и их обсуждение

При увеличении заблаговременности прогноза по каждой из рассматриваемых численных моделей происходит накопление ошибки, что проявляется в увеличении средней абсолютной ошибки прогноза QNH . На рисунке наглядно представлена эта закономерность. Таким образом, по данным модели GEM, ошибка в 1 гПа накапливается на конец первых суток прогноза. Что касается мезомасштабной модели WRF-ARW, то в среднем предельного значения погрешность прогноза достигает после 27 час счета. GFS дает допустимые значения давления с заблаговременностью приблизительно 30 час. Отсюда следует вывод о том, что по этим моделям прогноза погоды можно с достаточной степенью точности давать суточные прогнозы QNH . Для сравнения нужно отметить, что зональные прогнозы для местной авиации в коде GAMET даются с заблаговременностью до 6 час [4]. Это указывает на принципиальную возможность использования результатов счета каждой из представленных моделей для прогноза приведенного давления для авиации. Обращает на себя внимание тот факт, что WRF не дает никаких преимуществ по сравнению с GFS в плане заблаговременности и точности прогноза, можно даже отметить обратное – глобальная модель GFS оказывается даже немного точнее мезомасштабной модели WRF. И это несмотря на то, что результаты прогноза глобальной модели выступают в качестве начальных данных мезомасштабной модели WRF. Однако для прогноза минимальных значений QNH по районам полетов возрастает роль шага расчетной сетки. Поэтому данные WRF за счет более частой сетки (10 км) могут оказаться более предпочтительными, особенно если попытаться поэкспериментировать с параметрами счета модели для улучшения качества прогноза. Канадская модель GEM выглядит несколько хуже на начальном этапе, и здесь прогноз оказывается лучше на 15–18 час счета, затем абсолютная ошибка прогноза снова возрастает. Для того, чтобы удостовериться, действительно ли наблюдается такая закономерность нужны дополнительные исследования.

Расчет QNH с использованием синоптических карт. В ежедневной практике в целях подготовки прогнозов минимального давления QNH для его включения в сводки GAMET используются фактические значения этой величины, представленные в сводках в кодовых формах METAR и SPECI, которые по своей сути являются точечной информацией. В прогнозах GAMET информация о приведенном давлении является площадной характеристикой. Возникает вопрос, как сопоставить эти два вида информации. Тем более что районы прогнозирования могут быть удалены от аэродрома на сотни километров. Основной информацией о фактической погоде по району прогнозирования для синоптика являются кольцевые карты погоды. Плотность метеорологических станций на прогнозируемой территории больше, чем плотность авиационных метеорологических станций. При этом такая авиационная станция может быть единственной на весь обширный район. На кольцевой синоптической карте нанесены значения давления, приведенного к среднему уровню моря по реальной атмосфере, которые могут быть переведены в QNH . Для приведения атмосферного давления к среднему уровню моря по реальной атмосфере, как и в случае с QNH , используется барометрическая формула

для политропной атмосферы, которая представляет собой модель атмосферы с линейным изменением температуры воздуха с высотой и в которой вместо стандартной температуры воздуха используется виртуальная температура [7]:

$$T_v = T_z \left(1 + 0,378 \frac{e}{P_z} \right), \quad (3)$$

где T_z – температура воздуха на станции, K ; e – парциальное давление водяного пара на станции, $гПа$. Исходя из вышенаписанного, получаем:

$$P_{SL} = P_z \left(1 + \frac{\gamma z}{T_v} \right)^{\frac{g}{R_c \gamma}}. \quad (4)$$

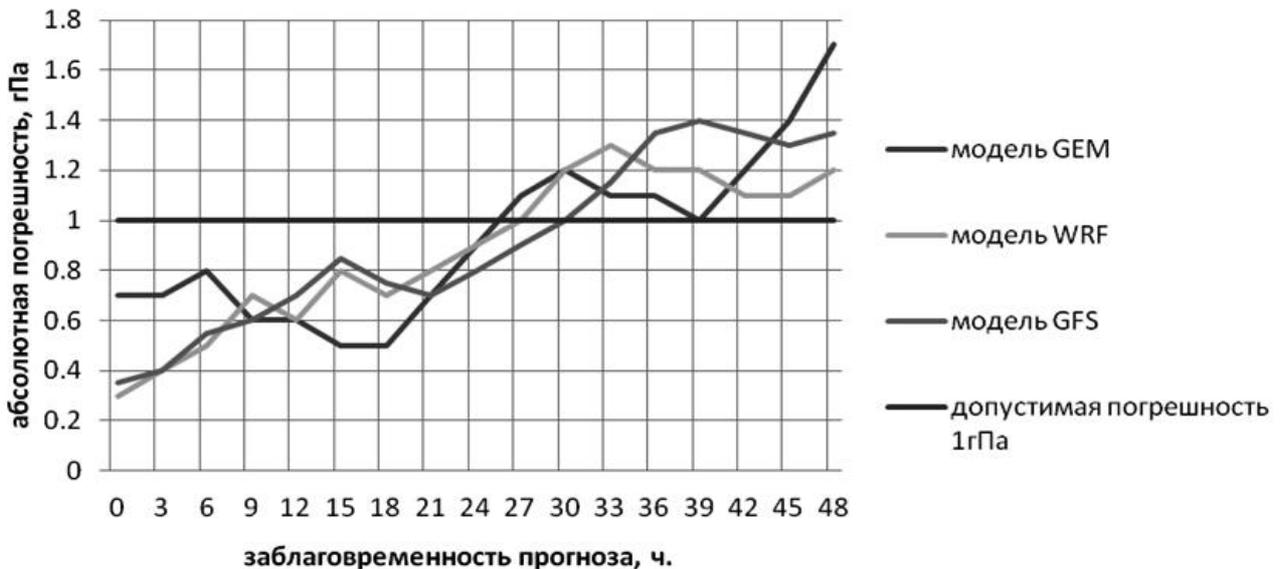


Рис. Зависимость абсолютной погрешности расчета QNH по данным численных моделей от заблаговременности прогноза

Из выражения (4) видно, что чем больше виртуальная температура воздуха у земной поверхности отличается от температуры стандартной атмосферы, тем больше различие между значениями давления, приведенными по реальной атмосфере (P_{SL}) и значениями давления, приведенными по стандартной атмосфере (P_{QNH}).

Объединив формулы для P_{QNH} и P_{SL} и исключив давление на уровне станции P_z , получим выражение для перехода от одного давления к другому.

$$P_{QNH} = P_{SL} \left(1 + \frac{\gamma z}{T_{st}} \right)^{\frac{g}{R_c \gamma}} \left(1 + \frac{\gamma z}{T_v} \right)^{-\frac{g}{R_c \gamma}}, \text{ или} \quad (5)$$

$$P_{QNH} = P_{SL} (1 + 2.2558 \cdot 10^{-5} z)^{5.2559} \left(1 + \frac{0.0065z}{T_v} \right)^{-5.2559}.$$

Если в качестве характеристики влажности используется температура точки росы, которая наносится на карты погоды, то парциальное давление водяного пара, необходимое для расчета виртуальной температуры, можно с достаточной степенью точности рассчитать по эмпирической формуле Магнуса [8]:

$$e = E_0 10^{\frac{a\tau}{b+\tau}}.$$

Здесь $E_0 = 6,1078 гПа$ – парциальное давление насыщенного водяного пара при температуре воздуха $0^\circ C$; τ – температура точки росы, $^\circ C$; коэффициенты a и b в формуле следующие: $a = 7,63$; $b = 241,9^\circ C$ для расчета парциального давления над поверхностью чистой воды и $a = 9,5$; $b = 265,5^\circ C$ над поверхностью чистого льда. Расчеты, проведенные нами, показали, что разность величин QNH , определенных по значениям коэффициентов над водой и надо льдом, находятся в пределах точности измерений. К тому же по синоптической карте нет возможности получить информацию о том, при

каких условиях рассчитывались характеристики влажности воздуха. Исходя из этого, ограничимся расчетами e над поверхностью воды.

Формула (5) позволяет вычислять фактические значения QNH при использовании кольцевых карт погоды, а также прогностические значения этой характеристики, когда в качестве исходной информации применяются прогностические приземные карты.

Имея фактические данные температуры воздуха, температуры точки росы, давления на уровне моря и давление P_{QNH} на территории аэродрома Пермь (Большое Савино), сравним результаты расчета QNH с использованием выражения (5) и найдем абсолютную погрешность вычислений.

При анализе расчетов можно отметить, что разность фактического и расчетного значений не превышает 0,1 гПа (таблица).

Среднее значение абсолютной погрешности значений QNH (гПа) на аэродроме Пермь (Большое Савино)

Месяц											
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0

Примечание: фактические данные представлены за период с 00:00 час ВСВ 01.01.2015 по 23:00 час ВСВ 31.12.2015 г.

Данный способ перевода фактического давления в давление QNH удобен для оценки барического поля, при отсутствии численного прогноза. Возможно использование метода при работе с прогностическими картами.

В этом случае схема прогнозирования минимального по району значения QNH будет следующей.

1. По картам синоптического анализа (кольцевым картам) и картам барической топографии, а также используемым картам приземного прогноза определяется общая синоптическая обстановка и тенденция изменения давления в заданном районе на период действия прогноза GAMET.

2. С помощью синоптического метода прогнозируется минимальное значение давления, приведенного к среднему уровню моря по реальной атмосфере для заданного района, которое ожидается в течение периода действия прогноза GAMET, а также прогнозируется температура и влажность воздуха (температура точки росы).

3. По формуле, связывающей давление на уровне моря по реальной и стандартной атмосфере, рассчитываем минимальное значение QNH .

Выводы

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- наибольшую заблаговременность прогноза QNH показала модель GFS. При прогнозе с использованием данной модели средняя абсолютная ошибка не превышает 1 гПа до 27 часов счета модели;
- модель WRF-ARW возможно использовать для прогноза QNH с заблаговременностью на сутки;
- модель GEM для прогнозирования данной величины наименее подходит из рассмотренных нами из-за более высокой ошибки прогноза по сравнению с WRF и GFS;
- перевод фактического давления, приведенного к уровню моря по реальной атмосфере, в давление QNH с использованием синоптических карт является качественной альтернативой при отсутствии численного прогноза поля давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационное письмо о переходе на использование давления, приведенного к среднему уровню моря по стандартной атмосфере (QNH). М.: Росгидромет, 2015. 6 с.
2. Подготовка персонала ОВД к обеспечению выполнения полетов воздушных судов с использованием давления, приведенного к уровню моря (QNH). Красноярск: Отдел организации профессиональной подготовки персонала филиала «Аэронавигация Центральной Сибири» ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», 2014. 79 с.
3. Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации. Монреаль: ИКАО, 2016. 218 с.
4. Инструктивный материал по прогнозам погоды в формате GAMET. М.: Росгидромет, 2015. 33 с.

5. Руководство по стандартной атмосфере ИКАО с верхней границей, поднятой до 80 километров. Монреаль: ИКАО, 1993. 305 с.
6. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM. М.: Гидрометцентр России, 2010. 42 с.
7. Методические указания по приведению атмосферного давления к уровню моря и вычислению высот изобарических поверхностей на метеорологических станциях. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 46 с.
8. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 780 с.

Поступила в редакцию 31.07.2018

Связов Евгений Михайлович, кандидат географических наук,
доцент кафедры метеорологии и охраны атмосферы
E-mail: sviyazov74@mail.ru

Глотова Анастасия Сергеевна, бакалавр гидрометеорологии, студент магистратуры
кафедры метеорологии и охраны атмосферы
E-mail: anastasiaglotova@gmail.com

ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»
614990, Россия, г. Пермь, ГСП, ул. Букирева, 15

E.M. Sviyazov, A.S. Glotova

THE FORECAST AND RECOVERY OF SEA-LEVEL STANDARD PRESSURE, USING HYDRODYNAMIC MODELS AND ACTUAL DATA OF SURFACE METEOROLOGICAL OBSERVATIONS

The estimation of an accuracy of sea-level standard pressure forecast is carried out, and the method of recovering its actual values by the data of ground meteorological network of stations is proposed. The results of calculation of the reduced pressure using numerical models of weather forecast WRF-ARW, GEM and GFS were used as initial data. It is revealed that these numerical models can be used to calculate the minimum values of the reduced pressure given by the standard atmosphere for their inclusion in the aeronautical forecast. It was found that the best results in the forecast were shown by the model GFS, and taking into account the more detailed spatial grid – by WRF-ARW. It is shown that the conversion of the actual pressure reduced to a sea-level by real atmosphere into standard pressure using synoptic charts is a qualitative alternative in the absence of a numerical forecast of a pressure field.

Keywords: reduced sea-level standard pressure, numerical models of weather forecast, average absolute error, aeronautical forecast, earliness of forecast.

REFERENCES

1. *Informacionnoe pis'mo o perekhode na ispol'zovanie davleniya, privedennogo k srednemu urovnyu morya po standartnoj atmosfere (QNH)* [Information letter on the transition to the use of reduced pressure to the average sea level in the standard atmosphere (QNH)]. М.: Rosgidromet, 2015. 6 p. (in Russ.).
2. *Podgotovka personala OVD k obespecheniyu vypolneniya poletov vozdushnyh sudov s ispol'zovaniem davleniya, privedennogo k urovnyu morya (QNH)* [Training of ATM personnel to ensure the flight of aircraft using the pressure brought to the average sea level in the standard atmosphere (QNH)]. Krasnoyarsk: Otdel organizatsii professional'noj podgotovki personala filiala "Aehronavigatsiya Central'noj Sibiri" FGUP "Goskorporatsiya po OrVD", 2014. 79 p. (in Russ.).
3. *Meteorologicheskoe obespechenie mezhdunarodnoj aehronavigatsii* [Meteorological service for international air navigation]. Montreal: ICAO, 2016. 218 p.
4. *Instruktivnyj material po prognozam pogody v formate GAMET* [Guidance material on area forecasts for low-level flights], М.: Rosgidromet, 2015. 33 p. (in Russ.).
5. *Rukovodstvo po standartnoj atmosfere IKAO s verhnej granicej, podnyatoj do 80 kilometrov* [Manual of the ICAO standard atmosphere extended to 80 kilometers (262 500 feet)]. Montreal: ICAO, 1993. 305 p. (in Russ.).
6. N.F. Vel'tishchev and V.D. Zhupanov *Chislennye prognozy pogody po negidrostaticheskim modelyam obshchego pol'zovaniya WRF-ARW i WRF-NMM* [Numerical weather forecasts for nonhydrostatic general use models WRF-ARW and WRF-NMM]. М.: Hydrometcenter of Russia, 2010. 42 p. (in Russ.).
7. *Metodicheskie ukazaniya po privedeniyu atmosfernogo davleniya k urovnyu morya i vychisleniyu vysot izobaricheskikh poverhnostej na meteorologicheskikh stanciyah* [Guidelines for the reduction of atmospheric pressure to sea level and calculation of isobaric surface heights at meteorological stations]. Л.: Gidrometeoizdat, 1979. 46 p. (in Russ.).
8. Matveev L.T. *Fizika atmosfery* [Atmospheric physics]. SPb.: Gidrometeoizdat, 2000. 780 p. (in Russ.).

Received 31.07.2018

Sviyazov E.M., Candidate of Geography, Associate Professor at Department of meteorology and atmosphere protection

E-mail: sviyazov74@mail.ru

Glotova A.S., postgraduate student at Department of meteorology and atmosphere protection

E-mail: anastasiaglotova@gmail.com

Perm State University

Bukireva st., 15, Perm, Russia, 614990