

ПРОВЕРКА ТОЧНОСТИ РАСЧЕТОВ ПРОФИЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ ПО МОДЕЛИ NRLMSISE-00 И КОРРЕКТИРОВКА МОДЕЛИ ДЛЯ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Я. В. Дробжева, Е.В. Винокурова

*Российский государственный гидрометеорологический университет,
г. Санкт-Петербург, e-mail: ydrobzheva@mail.ru*

Установлены количественные оценки ошибок расчета высотных профилей давления воздуха, полученных по модели нейтральной атмосферы NRLMSISE-00, на основе их сопоставления с экспериментальными профилями для Санкт-Петербурга. Разработана методика корректировки модели и представлены результаты ее использования.

Ключевые слова: атмосфера; модель; давление воздуха; корректировка модели.

TESTING THE ACCURACY OF CALCULATIONS OF PRESSURE PROFILES USING THE NRLMSISE-00 MODEL AND CORRECTING THE MODEL FOR SAINT-PETERSBURG

Ya.V. Drobzheva, E.V. Vinokurova

*Russian State Hydrometeorological University,
Saint-Petersburg, e-mail: ydrobzheva@mail.ru*

Quantitative estimates of errors in the calculation of altitude air pressure profiles obtained using the neutral atmosphere model NRLMSISE-00 have been established based on their comparison with experimental profiles for St. Petersburg. A methodology for correcting the model has been developed and the results of its use are presented.

Keywords: atmosphere; model; air pressure; model correction.

Международная эмпирическая модель нейтральной атмосферы NRLMSISE-00 позволяет рассчитать временные и пространственные распределения различных параметров атмосферы для любой области земного шара. Так как экспериментальные данные параметров атмосферы, особенно на больших высотах, не всегда доступны, использование модельных данных представляется единственно возможным. Актуальность работы обусловлена тем, что оценки точности расчетов давления по модели нейтральной атмосферы NRLMSISE-00 могут быть использованы для решения задачи по корректировке модели для рассматриваемого региона, а также для определения погрешностей решения физических задач, включающих данные, полученные по модели NRLMSISE-00 [1,2].

Целью работы является установление количественных оценок ошибок

расчета высотных и сезонных вариаций давления воздуха, полученных по модели нейтральной атмосферы NRLMSISE-00, на основе их сопоставления с экспериментальными профилями для Санкт-Петербурга, разработка методики корректировки модели и оценка ее успешности.

Краткая характеристика эмпирической модели нейтральной атмосферы NRLMSISE-00

Модель NRLMSISE-00 разработана на основе комплекса данных спутниковых, ракетных и радарных измерений, имеющих высокое временное и пространственное разрешение. Использование модели NRLMSISE-00 позволяет рассчитывать высотные, долготные и широтные зависимости, в частности, таких метеорологических величин, как температура и плотность. Входными параметрами модели являются: день года, всемирное время, высота, геодезические широта и долгота, индекс солнечной активности F10.7, индекс геомагнитной активности Ap. Исходные тексты программ модели представлены на сайте: http://uap-www.nrl.navy.mil/models_web/msis/msis_home.htm.

Модель NRLMSISE-00 используется для решения научных и прикладных задач: в частности, для расчета траекторий распространения акустических волн в атмосфере от источников естественного и искусственного происхождения при реализации инфразвукового метода дистанционного контроля наземных, подземных и воздушных химических и ядерных взрывов [2-4]. Модель также используется при решении задачи распространения радиоволн с частотами более 100 МГц в тропосфере для обеспечения работ в области радиолокации, радионавигации и моделирования отражений лидарных сигналов в верхней атмосфере [5,6].

Оценка адекватности модели атмосферы NRLMSISE-00 эксперименту

Для оценки точности модели были сопоставлены экспериментальные и модельные высотные профили давления для 2002 г. и 2009 г. – года высокой и низкой солнечной активности, соответственно. Для примера на рис. 1 представлены результаты для четырех сезонов 2002 г. и 00 UT, а на рис. 2 – результаты расчетов средней ошибки (δ) расчета по модели и среднеквадратичного отклонения (σ) для всего высотного профиля давления для каждого дня 2002 г. и 2009 г для 00 UT. В расчетах использовались значения давления от 0 до 23 км, с шагом 1 км. Выбор предельной высоты в 23 км обусловлен наличием экспериментальных данных для данного года.

Из рис. 1 видно, что расчеты высотных профилей давления по модели нейтральной атмосферы достаточно хорошо отражают реальную картину изменения давления с высотой, однако имеются расхождения, которые могут сыграть существенную роль при решении задач, требующих высокой точности.

Анализ результатов для года высокой и низкой солнечной активности показал, что средняя ошибка расчета давления по модели NRLMSIS-00 для территории Санкт-Петербурга имеет явно выраженный сезонный ход как для 2002, так и для 2009 года: максимальная средняя ошибка расчета отмечалась в зимний сезон, а минимальная – в летний. Максимальная средняя ошибка расчета для 00 UT для обоих лет относилась к февралю месяцу: в 2002 году - 21 февраля и равнялась 3104 Па, а в 2009 отмечалась 2 февраля и равнялась - 2279 Па. Минимальная средняя ошибка расчета относилась к летнему сезону: в 2002 году - 14 июня и равнялась 8 Па, а в 2009 отмечалась 26 августа и равнялась - 23 Па. При этом, для 2002 и 2009 годов, первый из которых характеризуется высоким уровнем солнечной активности, а второй низким, сезонные изменения и величины максимальных и минимальных средних ошибок расчета по абсолютной величине близки, но величины имеют противоположный знак. Это говорит о том, что модель недостаточно хорошо учитывает изменения солнечной активности для региона Санкт-Петербурга и требует дальнейшей доработки.

Корректировка модели по давлению для города Санкт-Петербурга. Оценка успешности корректировки модели

Корректировка модели для расчета высотных профилей давления для региона города Санкт-Петербурга проводилась на основе экспериментальных и модельных данных высотных профилей давления для периода 2002 года и времени 00 UT. Изменчивость среднемесячной ошибки расчета давления и среднеквадратичное отклонение по некорректированной модели в течение 12 месяцев представлено на рис. 3.

Из графика видно, что как среднемесячная ошибка (δ_m), так и среднеквадратичное отклонение расчета давления имеет явно выраженный сезонный ход; при этом абсолютное значение среднемесячной ошибки (δ_m) расчета давления по абсолютной величине максимально в феврале, а минимально в июне, что говорит о необходимости корректировки модели.

В каждом месяце выбирался день, для которого значение среднемесячной ошибки расчета давления наиболее близко к средней ошибке расчета высотного профиля давления. Далее для этого дня рассчитывались коэффициенты коррекции для всего высотного профиля.

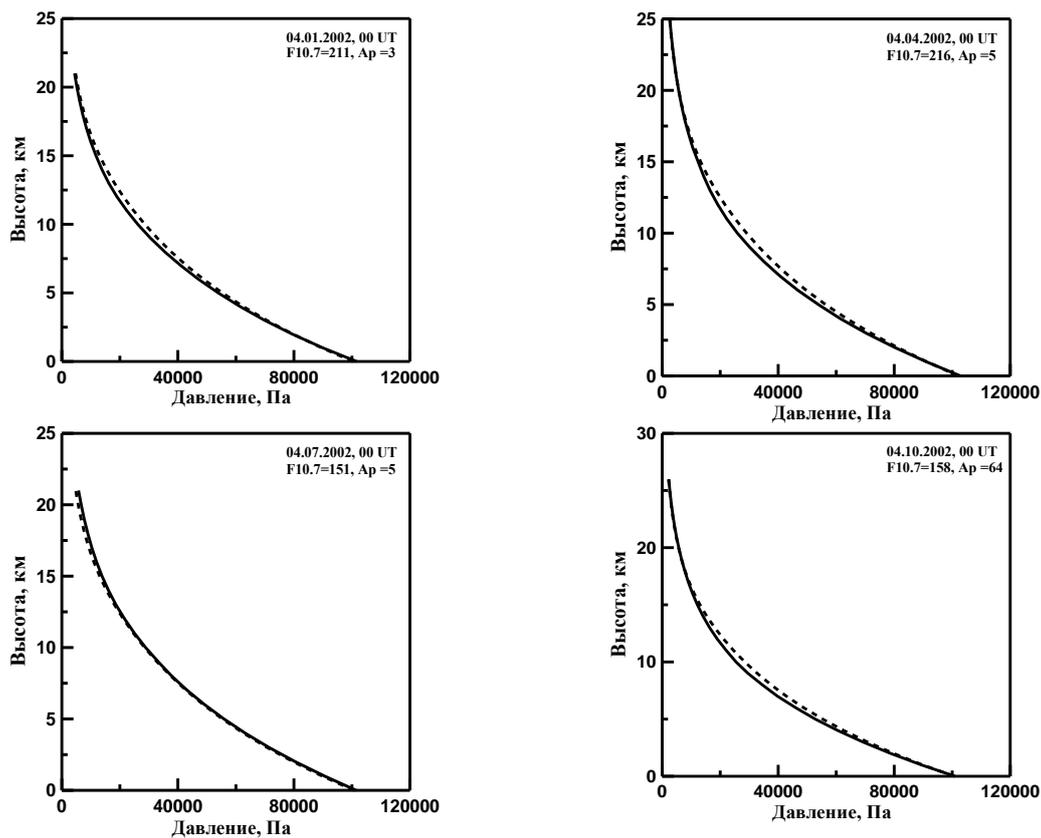


Рис. 1. Экспериментальные (сплошная линия) и модельные (штриховая линия с точками) высотные профили давления воздуха за четыре месяца 2002 года и 00 UT

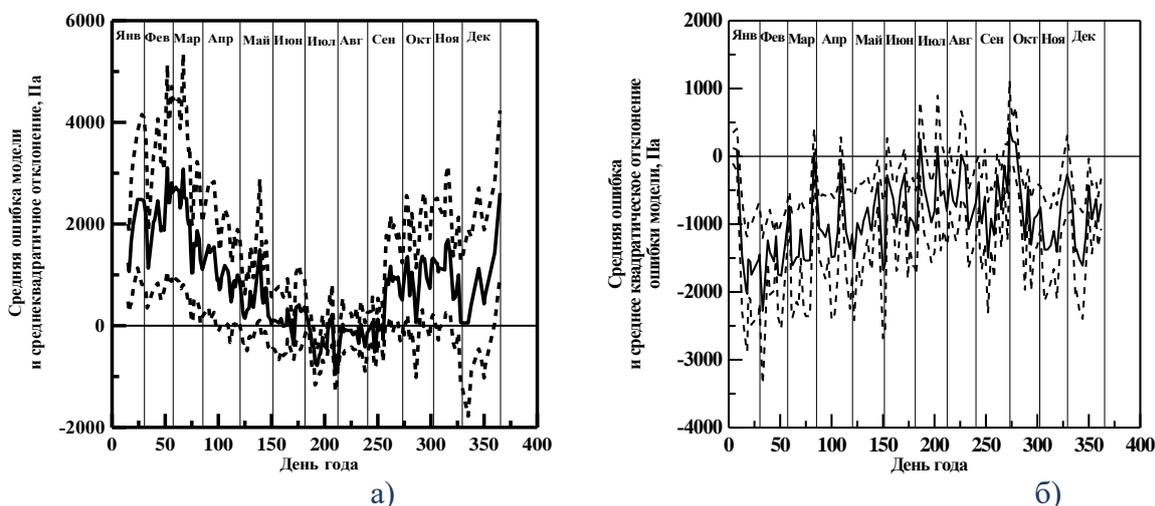


Рис. 2. Изменение значения средней ошибки расчета давления по модели (δ)– сплошная линия и среднеквадратичного отклонения (σ) с сезоном для 2002 г. (а) и 2009 г. (б) и 00 UT

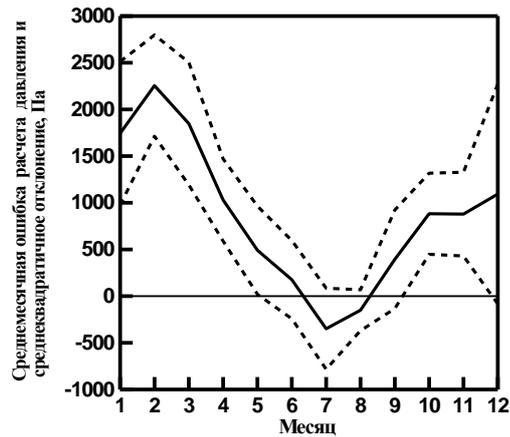


Рис. 3. Изменчивость среднемесячной ошибки (δ_m) расчета давления – сплошная линия и среднеквадратичное отклонение (σ_m) – штриховая линия по некорректированной модели в течение 2002 года для 00 UT

Расчет коэффициентов коррекции осуществлялся следующим образом. Для выбранного дня месяца проводилась аппроксимация экспериментальных и модельных высотных профилей давления полиномами четвертой степени, соответственно:

$$p_{ex} = a + b \cdot h + c \cdot h^2 + d \cdot h^3 + f \cdot h^4$$

$$p_m = aa + bb \cdot h + cc \cdot h^2 + dd \cdot h^3 + ff \cdot h^4, \quad (1)$$

где $a, b, c, d, f, aa, bb, cc, dd, ff$ – коэффициенты полиномов для экспериментального и модельного профиля давления.

Далее рассчитывался высотный профиль коэффициента коррекции для модели как отношение экспериментального значения к модельному для каждой высоты профиля давления

$$k(h) = \frac{p_{ex}(h)}{p_m(h)} \quad (2)$$

Для каждой высоты (шаг по высоте 1 км) рассчитывалось одно значение коэффициента коррекции. Для примера, на рис. 4 представлен высотный профиль коэффициента коррекции модели для 21 февраля 2002 года и 00 UT.

Таким образом, для каждого месяца рассчитывался один высотный профиль коэффициента коррекции, затем с его помощью корректируются высотные профили давления для каждого дня месяца. Для примера на рис. 5 представлены результаты коррекции модельных профилей давления 21 февраля и 14 июня 2002 года и 00 UT.

Зависимость среднемесячной ошибки расчета давления и среднеквадратичное отклонение после корректировки модели от сезона представлена на рис. 6(а) и вариации с сезоном среднемесячной ошибки (δ_m) до корректировки и после корректировки 6(б) для 2002 года и 00 UT.

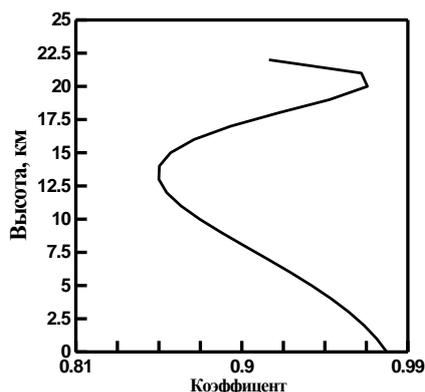


Рис. 4. Высотный профиль коэффициента коррекции модели для 21 февраля 2002 года и 00 UT

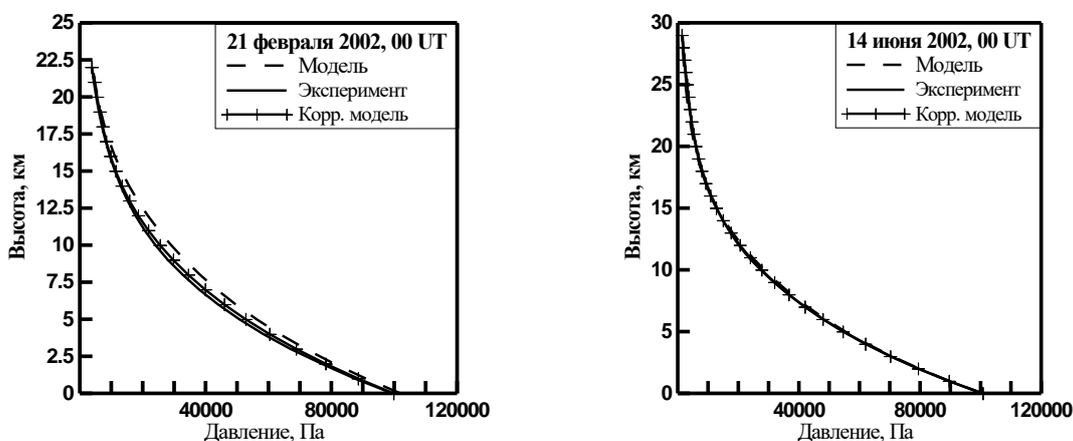


Рис. 5. Результаты коррекции модельных профилей давления 21 февраля, 14 июня, 1 апреля и 19 октября 2002 года и 00 UT. Эксперимент – сплошная, модель – штриховая, модель после корректировки – сплошная с точками

Из рис. 6 видно, что благодаря корректировке модели, среднюю ошибку расчетов удалось значительно уменьшить. Для оценки успешности проведенной корректировки модели для давления была исследована изменчивость значения среднемесячной ошибки для средних ошибок расчета высотных профилей давления в течение года по некорректированной модели и с учетом корректировки.

Видно, что применение методики корректировки модельных высотных профилей давления позволило значительно уменьшить среднюю ошибку расчета по модели. После корректировки модели зависимость средней ошибки от сезона становится слабо выраженной, то есть проведенная корректировка позволила убрать влияние сезона на поведение средней ошибки расчета давления по модели. По сути, скорректированная модель позволяет точнее учитывать зависимость профилей давления от сезона.

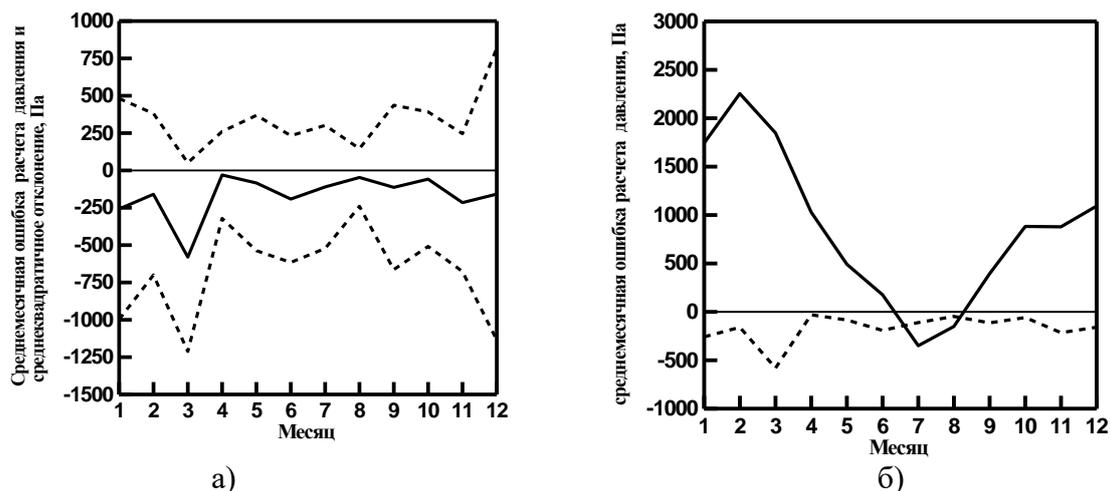


Рис. 6. Изменчивость среднемесячной ошибки (δ_m) расчета давления – сплошная линия и среднеквадратичное отклонение (σ_m) – штриховая линия после корректировки модели (а) и вариации с сезоном среднемесячной ошибки (δ_m) до корректировки (сплошная линия) и после корректировки (штриховая линия) (б) для 2002 года и 00 UT

Заключение

Анализ результатов для года высокой и низкой солнечной активности показал, что средняя ошибка расчета давления по модели NRLMSIS-00 для территории Санкт-Петербурга имеет явно выраженный сезонный ход как для 2002, так и для 2009 года: максимальная средняя ошибка расчета отмечалась в зимний сезон, а минимальная – в летний. Предложенная методика корректировки расчета высотных профилей давления по модели NRLMSIS-00 для Санкт-Петербурга позволила уменьшить ошибку расчета в несколько раз, а также убрать влияние сезона на поведение средней ошибки расчета давления по модели.

Библиографические ссылки

1. Picone J. M., Hedin A. E., Drob D. P. (2001). NRLMSISE00 Model. Naval Research Laboratory. 2001. [Электронный ресурс]. – URL: http://uap.www.navy.mil/models_web/msis/msis_home.htm.
2. Picone J. M., Hedin A. E., Drob D. P., Aikin A. C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. J. Geophys. Res. 2002. V. 107 (A12). P. 1468.
3. Drobzheva Ya. V., Krasnov V. M. Acoustic energy transfer to the upper atmosphere from surface chemical and underground nuclear explosions. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2006. V. 68. P. 578–585.
4. Краснов В. М., Дробжева Я. В. Нелинейная акустика в неоднородной атмосфере в рамках аналитических решений. Монография. Санкт-Петербург: Полиграфическое предприятие «Кром-Принт». 2018. 172 с.

5. Краснов В. М., Кулешов Ю. В., Лебедев А. Б. Глобальная модель атмосферы для расчета диэлектрической проницаемости. Труды III Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». 2014. Том 2. Санкт-Петербург. С. 304–308.

6. Набокин А. А. Моделирование отражений лидарных сигналов в верхней атмосфере. Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2018. № 2 (22). С. 28–32. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-22-2-28-32.