

Анализ и верификация высотного профиля температуры атмосферы для района г. Казани по данным радиопросвечивания на трассах спутник-спутник

О.И. Яковлев¹, А.П. Шлычков², О.Г. Хуторова³, А.А. Павельев¹, А.Г. Павельев¹,
С.С. Матюгов¹

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Фрязино, 141190, Россия
E-mail: ssm117@ire216.msk.su

²Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Казань, 420087, Россия

³Казанский федеральный университет, Казань, 420000, Россия
E-mail: olga.khutorova@kpfu.ru

Сравниваются зависимости температуры атмосферы от высоты, измеренные в период с 2007 по 2010 г. в районе г. Казани метеорологическими радиозондами и радиозатменным методом. Радиозондовые аэрологические измерения атмосферы проводились два раза в сутки в 0 и 12 часов мирового времени UTC, т.е. в 4 и 16 часов местного времени. Затменное радиопросвечивание осуществлялось радиоволнами дециметрового диапазона, излучавшимися навигационными спутниками GPS и принимавшимися на низкоорбитальных спутниках Formosat-3 при заходе их за лимб Земли по отношению к спутнику-передатчику. Несмотря на то, что радиозатменная система обеспечивает около 2000 радиопросвечиваний атмосферы в сутки для различных районов Земли, при анализе точности определений высотной зависимости температуры для конкретного небольшого климатического района удается получить всего одно радиопросвечивание за двое-трое суток, осуществленное в произвольное местное время. Приводятся данные о высотных профилях температуры, полученные двумя способами в разные сезоны года, в диапазоне высот от 0,5 до 25 км. Сравниваются данные 43 сеансов затменных зондирований и аэрологических измерений, отличающихся по времени не более чем на 1 ч и не более 250 км по расстоянию между радиозондом и районом, над которым проводилось радиопросвечивание атмосферы. Показано, что при указанных условиях на высотах более 6 км разница в значениях температуры, измеренной двумя методами, не превосходит $\pm 2^\circ\text{C}$. При низкой влажности в зимний сезон радиозатменные и метеорологические данные на высотах 1–3 км отличались не более чем на 4°C . В летнее время на высотах ниже 4 км радиозатменный метод дает существенно заниженные значения температуры из-за влияния влажности воздуха. Результаты определения вертикальных градиентов температуры в средней тропосфере отличаются не более чем на $\pm 0,6^\circ\text{C}/\text{км}$, а высоты тропопаузы — на $\pm 0,5$ км.

Ключевые слова: затменное радиопросвечивание, спутники, GPS, Formosat, атмосфера, температура

Одобрена к печати: 07.07.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-278-284

Введение и исходные данные

При использовании высокоорбитального спутника — излучателя радиоволн и низкоорбитального спутника — приемника сигналов лучевая линия радиоволн на затменных трассах осуществляет почти вертикальное сечение атмосферы. При этом регистрируются атмосферные изменения частоты, фазы и амплитуды сигналов в зависимости от минимальной высоты лучевой линии, что позволяет осуществить мониторинг атмосферы во всех районах Земли. Изменения указанных характеристик радиоволн на затменных межспутниковых трассах обусловлены высотным профилем коэффициента преломления атмосферы $n(h)$. Если распределение $n(h)$ можно считать сферически симметричным, то по радиоданным можно определить зависимость $n(h)$. Коэффициент преломления связан известным соотношением с температурой, давлением и влажностью, на этой основе был разработан сложный многоступенчатый алгоритм определения высотных профилей температуры $T_r(h)$.

Определяемую таким образом T_r относят к условной «сухой температуре», так как высотное распределение влажности не учитывается. Этапы развития теории и результаты экспериментальных исследований радиозатменного метода мониторинга атмосферы описаны в обзорах (Павельев, Матюгов, Яковлев, 2008; Яковлев, Павельев, Матюгов, 2002) и книгах (Яковлев, Павельев, Матюгов, 2010; Steiner et al., 2009). При практической реализации радиозатменного метода определения высотного профиля температуры $T_r(h)$ проявляются трудно контролируемые ошибки, обусловленные влиянием горизонтальных градиентов характеристик атмосферы, неточностями знания орбит спутников, мешающим влиянием ионосферы и трудностью учета влияния влажности и облаков. Способом выяснения реальной точности зависимости $T_r(h)$, определяемой радиозатменным методом, является сравнение с высотным профилем $T_m(h)$, полученным метеорологическим зондированием. Такой сравнительный анализ зависимостей $T_r(h)$ и $T_m(h)$ возможен, если метеорологическое и спутниковое зондирование атмосферы осуществлены в одном относительно небольшом районе и примерно в одинаковое время.

Цель этого краткого сообщения состоит в сравнении экспериментальных профилей $T_r(h)$ и $T_m(h)$ и выяснении на этой основе точности определений высотного профиля температуры спутниковым радиозатменным методом для европейского района России с координатами 55–58° с.ш. и 46–52° в.д. Для решения этой задачи использовались данные радиозатменной миссии, образованной навигационными спутниками GPS (излучатели радиоволн) и исследовательскими спутниками Formosat 3 (приемники сигналов). Система GPS работает в двух диапазонах: $f_1 = 1575,4$ МГц и $f_2 = 1227,6$ МГц, что позволяет существенно уменьшить мешающее влияние ионосферы. Эта опытная радиозатменная система обеспечивает около 2000 радиопросвечиваний атмосферы в сутки для различных районов Земли. При анализе точности определений зависимости $T_r(h)$ для конкретного небольшого климатического района удастся получить всего одно радиопросвечивание за двое-трое суток, осуществленное в произвольное местное время. Метеорологическое зондирование атмосферы осуществляется два раза в сутки в 0 и 12 часов мирового времени UTC, т.е. в 4 и 16 часов местного времени. Мы использовали экспериментальные зависимости $T_m(h)$, по данным метеопункта № 27595, расположенного вблизи г. Казани. При сравнении экспериментальных зависимостей $T_r(h)$ и $T_m(h)$ введено жесткое ограничение на разность времени метеорологического и радиозатменного зондирования Δt и расстояния L между метеопунктом и районом радиопросвечивания атмосферы. Мы приняли, что сравнение указанных зависимостей возможно, если Δt не более одного часа, а L не более 250 км. При таком отборе экспериментальных данных удалось получить сведения о 43 парах высотных профилей T_r и T_m в разные сезоны с 2007 по 2010 гг.

Результаты сравнительного анализа

Сравнение экспериментальных зависимостей $T_r(h)$ и $T_m(h)$ позволяет установить область высот h , где радиозатменные данные хорошо соответствуют результатам

метеорологического зондирования, а при каких h регистрируется сильное их отличие. На *рис. 1* приведены, для примера, две пары типичных зависимостей $T_r(h)$ и $T_m(h)$. Зависимости $T_r(h)$ обозначены символом r , а значения T_m , полученные при метеорологическом зондировании атмосферы, даны графиками с экспериментальными точками и указаны буквой m . Пара высотных профилей 1 соответствует жаркому летнему дню 25 июня 2010 г. (местное время 16 часов), а нижние кривые 2 получены в зимнее очень холодное время 16 января 2010 г. (местное время около 4 часов). Сравнение аналогичных пар зависимостей $T_r(h)$ и $T_m(h)$ как для теплого, так и для холодного времени показало, что при $h = 6–25$ км разность $\Delta t = T_m - T_r$ не превосходит $\pm 2^\circ\text{C}$.

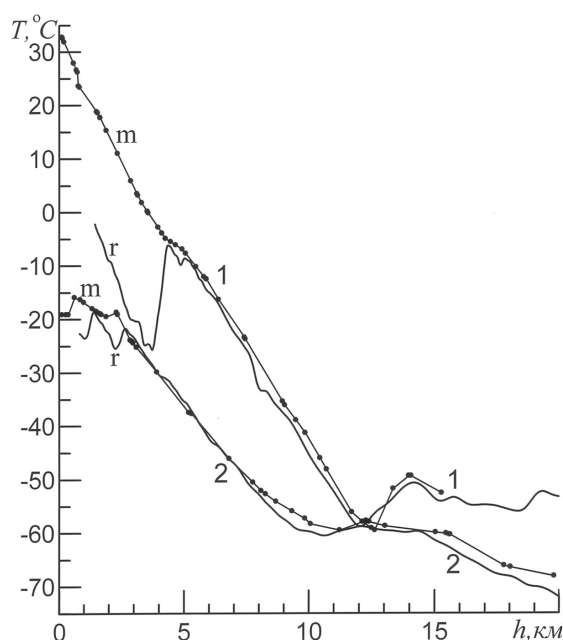


Рис. 1. Примеры высотных профилей температуры зимой и летом

Рассмотрим подробнее зависимости $T_r(h)$ и $T_m(h)$ при $h < 9$ км. На *рис. 2* приведены результаты радиозатменных и метеозондовых измерений высотных профилей температуры в тропосфере. Как и на *рис. 1*, метео- и радиозатменные данные, представлены парами кривых, обозначенных номерами от 3 до 6; кривые с точками соответствуют метеорологическим данным (символ m), а радиозатменные зависимости отмечены символом r . Пары кривых 4, 5 и 6 сдвинуты по оси ординат относительно пары 3: пара 4 сдвинута на 20°C , пара 5 — на 40°C , а пара 6 — на 60°C . Пунктирные линии, обозначенные символами 0_3 , 0_4 , 0_5 и 0_6 , указывают температуру, равную 0°C , для соответствующих пар графиков. Пары 3 и 4 показывают зависимости $T_r(h)$ и $T_m(h)$ при теплой и влажной тропосфере, полученные в 0 ч UTC 24.05.2010 и 26.02.2008, когда на высоте 3 км температура T_m и относительная влажность ϕ были соответственно равны: $-2,5^\circ\text{C}$, 72% и $-13,4^\circ\text{C}$, 97%. В этих условиях разность $T_m - T_r$ при $h = 3$ км была равна: 21°C и 9°C . Пары графиков 5 и 6 получены при очень холодном воздухе и малой влажности в 0 ч UTC 23.02.2009. и 12 ч UTC 02.02.2007, когда на высоте 2,6 км температура и влажность были соответственно равны: $T_m = -14,8^\circ\text{C}$, $\phi = 14\%$ и $T_m = -19,1^\circ\text{C}$, $\phi = 19\%$.

При этом зарегистрировано малое различие $T_m(h)$ и $T_r(h)$, разность этих величин даже на высотах 1–2 км не превосходила 4°C .

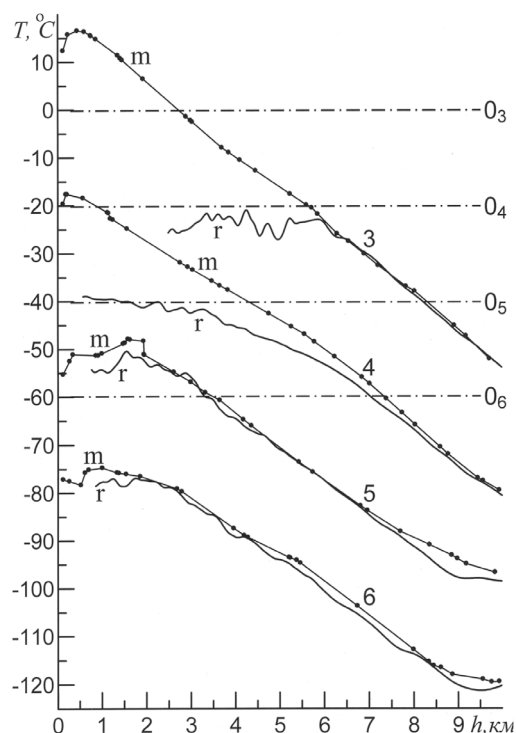


Рис. 2. К сравнению температуры T_r и T_m в тропосфере

Из массива обработанных данных и типичных примеров, представленных на рис. 1 и 2, следует, что при низкой влажности (графики 2, 5 и 6) радиозатменные и метеорологические данные на высотах 1–3 км отличаются не более чем на 4°C , а при высокой влажности и мощных облачных структурах (графики 1, 3 и 4) на высотах 1–4 км регулярно регистрируется большое различие $T_r(h)$ и $T_m(h)$. В этих условиях радиозатменные данные о высотном профиле температуры становятся недостоверными. Необходимо отметить, что в таких условиях часто наблюдаются сбои в работе радиозатменной системы спутник-спутник, когда на высотах около 2 км прекращаются измерения фазы и амплитуды радиоволн.

Сравнение определений вертикального градиента температуры для высотного интервала 4,5–8,5 км по радиозатменным и метеорологическим данным показало, что в разные дни разность пар $(dT_m/dh) - (dT_r/dh)$ не превосходит $\pm 0,6^\circ\text{C}/\text{км}$. Среднее значение градиентов в разные сезоны было равно: зимой $dT_m/dh = 7,18^\circ\text{C}/\text{км}$, $dT_r/dh = 7,13^\circ\text{C}/\text{км}$, а весной, летом и осенью $dT_m/dh = 7,30^\circ\text{C}/\text{км}$, $dT_r/dh = 7,24^\circ\text{C}/\text{км}$.

Для оценки точности определений высоты тропопаузы h_{tr} радиозатменным методом мы провели сравнение этой характеристики атмосферы с высотой тропопаузы h_{tm} по метеорологическим данным. В метеорологии высоту тропопаузы принято определять как значение h , где градиент dT/dh становится равным или несколько меньше $2^\circ\text{C}/\text{км}$. Используя этот критерий для пар измерений, мы нашли, что по модулю разность $h_{tm} - h_{tr}$ в разные дни не превосходит 0,5 км. Средние значения высоты тропопаузы зимой было равно: $h_{tm} = 10$ км, $h_{tr} = 9,9$ км, а весной, летом и осенью $h_{tm} = 11,3$ км, $h_{tr} = 11,2$ км.

Анализ точности определения температуры радиозатменным методом для экваториальных районов и территории США был проведен в работах (Nishida et al., 2000; Rocken et al., 1997; Schmidt et al., 2004; Steiner et al., 2009; Ware et al., 1996). В этих публикациях также показано, что в области тропопаузы и стратосферы разность ΔT не превосходит 2°C , а в нижней тропосфере наблюдается недопустимо большое различие ΔT .

Заключение

При сравнении радиозатменных и метеорологических данных следует иметь в виду, что основная погрешность датчика температуры, используемого при измерениях с помощью российских стандартных метеозондов МРЗ-3А, равна $1,8^\circ\text{C}$. Анализ пар высотных профилей температуры, полученных радиозатменным методом $T_r(h)$ и метеорологическим зондированием атмосферы $T_m(h)$ в районе г. Казани, показал, что на высотах 6–25 км разность $T_m - T_r$ в разные дни не превосходит 2°C , различие вертикального градиента температуры на высотах 4–8 км не более $0,5^\circ\text{C}/\text{км}$, а разность определения высоты тропопаузы $h_m - h_r$ не более 0,5 км. При низкой влажности тропосферы определение высотного профиля температуры радиозатменным методом достоверны при $h > 2$ км, а при высокой влажности и присутствии облаков надежное определение температуры реализуется только при $h > 6$ км. Сопоставление разности $\Delta T = T_m(h) - T_r(h)$ и влажности тропосферы показало, что чем выше влажность, тем больше различие ΔT .

Из принципа радиозатменного метода следует, что если из независимых данных задать высотный профиль влажности, то возможно точное определение профиля температуры $T(h)$, или если задать профиль $T(h)$, то можно определить влажность и водозапас тропосферы. В работе (Kursinski, Hajj, 2001) дан детальный анализ возможностей определения по радиозатменным данным высотного профиля влажности, если использовать модели распределения температуры, и показано, что таким методом удастся получать карты глобального распределения водозапаса тропосферы.

Иной путь развития радиозатменного метода, представленного в статьях (Елисеев, Яковлев, 1989; Матюгов, Яковлев, Вилков, 1994; Яковлев, Матюгов, 2005), предполагает дополнительно использовать при измерениях сантиметровые или миллиметровые волны. Радиоволны этого диапазона испытывают на затменных спутниковых трассах сильное атмосферное поглощение, что позволяет по амплитудным данным определять высотный профиль влажности, не прибегая к дополнительным данным. Использование высотных профилей влажности, полученных по амплитудным данным радиопросвечивания, позволяет учесть вклад влажности в зависимость коэффициента преломления $n(h)$ и по хорошо разработанному алгоритму определить высотный профиль температуры с высокой точностью и в нижней тропосфере. Определение высотной зависимости влажности радиозатменным методом с применением коротких сантиметровых или миллиметровых радиоволн расширяет возможности радиозатменного метода мониторинга атмосферы, так как позволяет изучать влагозапас тропосферы и особенности облачных структур.

Другое направление глобального мониторинга атмосферы связано с совместным использованием данных высотного распределения влажности, получаемых методом спутниковой радиометрии, и определений высотного профиля температуры радиозатменным методом. Использование профиля влажности, определяемого спутниковым радиометрическим методом, изложенным, например, в книге (Кутуза, Данилычев, Яковлев, 2016), позволит находить радиозатменным методом температуру тропосферы на высотах $h > 1$ км.

Литература

1. Елисеев С.Д., Яковлев О.И. О радиопросвечивании атмосферы Земли в диапазоне миллиметровых радиоволн // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1989. Т. 32. № 1. С. 3–10.
2. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: URSS, 2016. 336 с.
3. Матюгов С.С., Яковлев О.И., Вилков И.А. Поглощение сантиметровых и дециметровых радиоволн при затменных экспериментах на трассах спутник-спутник // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39. № 8-9. С. 1251–1258.
4. Павельев А.Г., Матюгов С.С., Яковлев О.И. Спутниковый глобальный мониторинг атмосферы и ионосферы // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 9. С. 1081–1093.
5. Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С. Развитие спутникового радиозатменного метода мониторинга атмосферы и ионосферы // Успехи современной радиоэлектроники. 2002. № 9. С. 8–16.
6. Яковлев О.И., Матюгов С.С. Анализ атмосферного поглощения сантиметровых радиоволн на затменных трассах спутник-спутник // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. № 3. С. 277–284.
7. Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С. Спутниковый мониторинг Земли: Радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы. М.: URSS. 2010. 208 с.
8. Kursinski E.R., Hajj G.A. A comparison of water vapor derived from GPS occultations and global weather analyses // J. Geophysical Research. 2001. Vol. 106. No. D1. P. 1113–1138.
9. Nishida M., Tsuda T., Rocken C., Ware H., Nakane H., Sugimoto N. Verification of temperature profiles obtained by GPS occultation technique with radiosonde and lidar measurements in tropical and subtropical regions // J. Meteorological Society of Japan. 2000. Vol. 78. P. 691–705.
10. Rocken C., Anthes R., Exner M., Hunt D., Sokolovskiy S., Ware R., Gorbunov M., Schreiner W., Feng D., Herman B., Kuo Y.-H., Zou X. Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere // J. Geophysical Research. 1997. Vol. 102. No. D25. P. 29 849–29 866.
11. Schmidt T., Wickert J., Beyerle G., Geophysical Research. Tropical tropopause parameters derived from GPS radio occultation measurements with CHAMP // J. Geophysical Research. 2004. Vol. 109. No. D13, P. 1–13.
12. Steiner A., Pirscher B., Foelsche U., Kirchengast G. (Eds). New horizons in occultation research. Studies in atmosphere and climate. Heidelberg: Springer, 2009. 316 p.
13. Ware R., Exner M., Feng D., Gorbunov M., Hardy K., Herman B. GPS sounding of the atmosphere from low Earth orbit // Bull. American Meteorological Society. 1996. Vol. 77. No. 1. P. 19–55.

Analysis and verification of vertical profile of atmospheric temperature for Kazan area according to radio occultation in satellite-to-satellite communication line

O.I. Yakovlev¹, A.P. Shlychkov², O.G. Khutorova³, A.A. Pavelyev¹, A.G. Pavelyev¹, S.S. Matyugov¹

¹V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Fryazino Branch
Fryazino 141190, Russia
E-mail: ssm117@ire216.msk.su

²Institute of Ecology and Natural Resources, Tatarstan Academy of Sciences
Kazan 420087, Russia

³Kazan Federal University, Kazan 420000, Russia
E-mail: olga.khutorova@kpfu.ru

The altitude temperature dependences in the atmosphere, measured in the period from 2007 to 2010 in the area of Kazan by meteorological radiosondes and radio occultation method are compared. Radiosonde measurements of the atmosphere were conducted twice a day at 0 and 12 UTC, i.e. at 4 and 16 h local time. The radio occultation experiments

were carried out using radio waves emitted by GPS navigation satellites in the decimeter range and received on low Earth orbit satellites Formosat-3 when they entered the Earth's limb relative to the satellite-transmitter. Despite the fact that the radio occultation method provides about 2,000 atmospheric soundings per day for different regions of the Earth, when analyzing the accuracy in the measurements of the vertical temperature profiles for a particular small climatic region, it is possible to obtain only one radio sounding in two, three days, at an arbitrary local time. When comparing the experimental dependencies, a strict restriction of not more than one hour has been introduced on the difference in the time of meteorological and radio occultation soundings. The distance between the radiosonde and the area of radio sounding of the atmosphere was chosen to be less than 250 km. The data of 43 sessions of the radio occultation soundings of the temperature altitude profiles obtained by two ways in different seasons of the year are given in the altitude range from 0.5 to 25 km were compared. It is shown that under such conditions at altitudes of more than 6 km the difference in the values of the temperature measured by the two methods does not exceed ± 2 °C. At low humidity in the winter season, radio occultation and meteorological data at altitudes of 1 to 3 km differed by not more than 4 °C. At altitudes below 4 km the radio occultation method gives an underestimate of the temperature because of the influence of air humidity. The results of determining the vertical temperature gradients in the middle troposphere differ by no more than ± 0.6 °C/km, and the height of the tropopause — by ± 0.5 km.

Keywords: radio occultation, satellites, GPS, FORMOSAT, atmosphere, temperature

Accepted: 07.07.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-278-284

References

1. Eliseev S.D., Yakovlev O.I., Using millimeter radio waves to probe the Earth's atmosphere, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 1989, Vol. 32, No. 1, pp. 1–7.
2. Kutuza B.G., Danilychev M.V., Yakovlev O.I., *Sputnikovyj monitoring Zemli: Microvolnovaya radiometriya atmosfery i poverkhnosti* (Remote sensing of the Earth: Microwave radiometry of the atmosphere and surface), Moscow: URSS, 2016, 336 p.
3. Matyugov S.S., Yakovlev O.I., Vilkov I.A., Pogloshchenie santimetrovykh i detsimetrovykh radiovoln pri zatmennykh eksperimentakh na tpassakh sputnik-sputnik (Absorption of centimeter and decimeter radio waves from data of radio occultation experiments using telecommunication satellite-to-satellite lines), *Radiotekhnika i elektronika*, 1994, Vol. 39, No. 8-9, pp. 1251–1258.
4. Pavelev A.G., Matyugov S.S., Yakovlev O.I., Global satellite monitoring of the atmosphere and ionosphere, *J. Communications Technology and Electronics*, 2008, Vol. 53, No. 9, pp. 1021–1033.
5. Yakovlev O.I., Pavelev A.G., Matyugov S.S., Razvitie sputnikovogo radiozatmennogo monitoringa atmosfery i ionosfery (Advances of satellite radio occultation method as applied to remote sensing the atmosphere and ionosphere), *Uspekhi sovremennoj radioelektroniki*, 2002, No. 9, pp. 8–16.
6. Yakovlev O.I., Matyugov S.S., Analiz atmosfernogo pogloshcheniya santimetrovykh radiovoln na zatmennykh trassakh sputnik-sputnik (Analysis of atmospheric absorption of radio waves in the centimeter wavelength range using radio occultation measurements in telecommunication satellite-to-satellite lines), *Radiotekhnika i elektronika*, 2005, Vol. 50, No. 3, pp. 277–284.
7. Yakovlev O.I., Pavelev A.G., Matyugov S.S., *Sputnikovyj monitoring Zemli: Radiozatmennyy monitoring atmosfery i ionosfery* (Remote sensing of the Earth: Radio occultation monitoring of the atmosphere and ionosphere), Moscow: URSS, 2010, 208 p.
8. Kursinski E.R., Hajj G.A., A comparison of water vapor derived from GPS occultations and global weather analyses, *J. Geophysical Research*, 2001, Vol. 106, No. D1, pp. 1113–1138.
9. Nishida M., Tsuda T., Rocken C., Ware H., Nakane H., Sugimoto N., Verification of temperature profiles obtained by GPS occultation technique with radiosonde and lidar measurements in tropical and subtropical regions, *J. Meteorological Society of Japan*, 2000, Vol. 78, pp. 691–705.
10. Rocken C., Anthes R., Exner M., Hunt D., Sokolovskiy S., Ware R., Gorbunov M., Schreiner W., Feng D., Herman B., Kuo Y.-H., Zou X., Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere, *J. Geophysical Research*, 1997, Vol. 102, No. D25, pp. 29849–29866.
11. Schmidt T., Wickert J., Beyerle G., Reigber C., Tropical tropopause parameters derived from GPS radio occultation measurements with CHAMP, *J. Geophysical Research*, 2004, Vol. 109, No. D13, pp. 1–13.
12. Steiner A., Pirscher B., Foelsvhe U., Kirchengast G. (Eds), *New horizons in occultation research. Studies in atmosphere and climate*, Heidelberg: Springer, 2009, 316 p.
13. Ware R., Exner M., Feng D., Gorbunov M., Hardy K., Herman B., GPS sounding of the atmosphere from low Earth orbit, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, Vol. 77, No. 1, pp. 19–55.