

*В.В. Чукин, Е.С. Алдошкина, А.В. Вахнин,  
А.Ю. Канухина, О.А. Мельникова*

### **МОНИТОРИНГ ИНТЕГРАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА В АТМОСФЕРЕ ГНСС-СИГНАЛАМИ**

*V.V. Chukin, E.S. Aldoshkina, A.V. Vakhnin,  
A.Yu. Kanukhina, O.A. Mel'nikova*

### **MONITORING OF PRECIPITABLE WATER VAPOUR IN ATMOSPHERE BY GNSS-SIGNALS**

*В работе рассматриваются вопросы дистанционного зондирования атмосферы путем наземной регистрации и обработки радиосигналов глобальной навигационно-спутниковой системы (ГНСС) с целью определения содержания водяного пара в вертикальном столбе атмосферы. Приводится полный математический аппарат расчета интегрального содержания водяного пара в атмосфере. Осуществлена оценка точности определения содержания водяного пара в атмосфере.*

*Ключевые слова: дистанционное зондирование атмосферы, водяной пар, глобальная навигационная спутниковая система.*

*The paper deals with remote sensing of the atmosphere by ground-based recording and processing signals of global navigation satellite system (GNSS) to determine the water vapor in a vertical column of atmosphere. A complete mathematical apparatus for calculating the precipitable water vapor content in the atmosphere is shown. The accuracy of measurement of the precipitable water vapor content in the atmosphere is estimated.*

*Key words: remote sensing of the atmosphere, water vapor, global navigation satellite system.*

## **Введение**

В данной работе рассматриваются вопросы ГНСС-метеорологии, в частности, дистанционное зондирование атмосферы методом радиопросвечивания сигналами навигационных спутников с целью определения интегрального содержания водяного пара в вертикальном столбе атмосферы.

Метод радиопросвечивания атмосферы предполагает определение параметров состояния атмосферы по результатам измерения пространственных задержек радиосигналов, распространяющихся через слой атмосферы от спутника к наземному приемнику, вследствие уменьшения фазовой скорости радиоволн за счет эффектов поляризации молекул азота, кислорода, углекислого газа и водяного пара. В качестве источников радиосигналов используются навигационные сигналы космических аппаратов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), которая в настоящее время состоит из двух радионавигационных систем: ГЛОНАСС (Россия) и GPS (США). В стадии разработки находятся еще несколько систем: Galileo (Евросоюз), Compas (Китай), QZSS (Япония).

Использование информации с сети наземных приемных ГНСС-станций позволяет определять задержки радиосигналов с более высокой точностью за счет использования групповой обработки результатов фазовых измерений псевдодальности до спутников.

### Показатель преломления радиоволн в тропосфере

Показатель преломления радиоволн в нейтральной атмосфере может быть представлен в виде:

$$n = 1 + \frac{k_1(P - e)}{T} + \frac{k_2e}{T} + \frac{k_3e}{T^2}, \quad (1)$$

где  $k_1 = 7,76 \cdot 10^{-7}$  К/Па;  $k_2 = 7,04 \cdot 10^{-7}$  К/Па;  $k_3 = 3,739 \cdot 10^{-3}$  К<sup>2</sup>/Па [Boudouris, 1963; Smith, 1953; Thayer, 1974];  $P$  – атмосферное давление, Па;  $T$  – температура воздуха, К;  $e$  – парциальное давление водяного пара, Па.

Уравнение для расчета показателя преломления (1) можно представить как зависимость от плотности воздуха ( $\rho = \rho_d + \rho_v$ ) и плотности водяного пара  $\rho_v$ :

$$n = 1 + k_1 R_d \rho + \left( k_2' R_v + \frac{k_3 R_v}{T} \right) \rho_v, \quad (2)$$

где  $R_d = 287,054$  Дж/(кг · К);  $R_v = 461,526$  Дж/(кг · К);  $k_2' = k_2 - k_1 \frac{R_d}{R_v}$ .

### Задержка радиосигнала в тропосфере

Дополнительная задержка радиосигнала, связанная с прохождением через тропосферный слой, может быть определена по формуле:

$$\Delta L_{TR} = \int_0^L (n - 1) dl, \quad (3)$$

где  $\Delta L_{TR}$  – пространственная задержка радиосигнала в тропосфере, м;  $L$  – расстояние, проходимое радиосигналом, м;  $n$  – показатель преломления радиоволн;  $l$  – путь вдоль траектории радиолуча, м.

Схема прохождения через тропосферу радиосигнала от навигационного приемника до приемного устройства представлена на рис. 1.

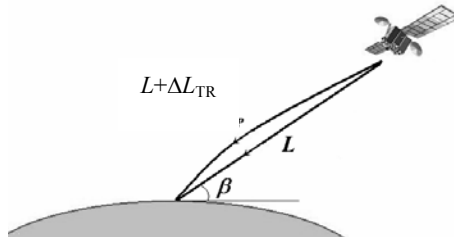


Рис. 1. Задержка радиосигнала в тропосфере

На рис. 2 представлена типичная зависимость тропосферной задержки ГНСС-сигнала от высоты спутника над горизонтом. Из рис. 2 видно, что при расположении спутника в зените задержка радиосигнала составляет около 2,3 м и увеличивается по мере приближения к горизонту.

Из формулы (3) с учетом формулы (2) получается:

$$\Delta L_{TR} = k_1 R_d \int_0^L \rho dl + \int_0^L \left( k_2' R_v + \frac{k_3 R_v}{T} \right) \rho_v dl . \quad (4)$$

Таким образом, из формулы (4) видно, что задержку сигнала в тропосфере можно представить в виде суммы гидростатической задержки, связанной с прохождением радиосигнала сквозь тропосферу, где давление с высотой убывает в соответствии с гидростатическим законом, и задержки за счет распространения в водяном паре:

$$\Delta L_{TR} = \Delta L_d + \Delta L_v , \quad (5)$$

где  $\Delta L_d$  – гидростатическая часть пространственной задержки сигнала, м;  $\Delta L_v$  – пространственная задержка сигнала, обусловленная распространением радиоволн в водяном паре, м.

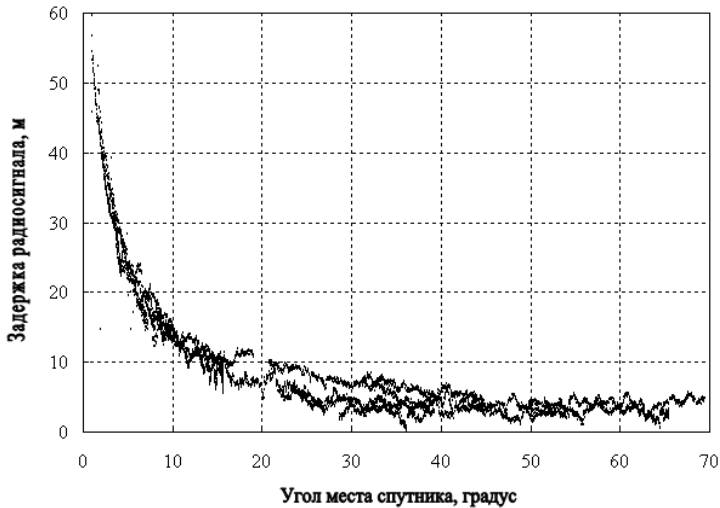


Рис. 2. Зависимость задержки радиосигнала в тропосфере от высоты навигационного спутника над горизонтом

**Гидростатическая задержка радиосигнала в тропосфере**

Гидростатическая задержка сигнала может быть представлена следующим образом:

$$\Delta L_d = \Delta L_d^{90^\circ} m_d . \quad (6)$$

Здесь  $\Delta L_d^{90^\circ}$  – гидростатическая задержка радиосигнала в тропосфере при вертикальном распространении, м;  $m_d$  – отображающая функция, зависящая от угла места навигационного спутника  $\beta$ .

В случае вертикального распространения сигнала от спутника до приемника гидростатическая часть задержки равна:

$$\Delta L_d^{90^\circ} = k_1 R_d \int_0^\infty \rho dz . \quad (7)$$

Поскольку приземное атмосферное давление определяется как [Davis, 1985]:

$$P_0 = \int_0^\infty \rho g dz = g_m \int_0^\infty \rho dz , \quad (8)$$

где  $g_m = 9,784 [1 - 2,66 \cdot 10^{-3} \cos(2\varphi) - 2,8 \cdot 10^{-7} h]$ .

Тогда, с учетом  $\int_0^\infty \rho dz = \frac{P_0}{g_m}$ , получается расчетная формула для определения гидростатической части задержки радиосигнала при вертикальном распространении [Davis, 1985]:

$$\Delta L_d^{90^\circ} = \frac{k_1 R_d P_0}{g_m} = \frac{2,2768 \cdot 10^{-5} P_0}{1 - 2,66 \cdot 10^{-3} \cos(2\varphi) - 2,8 \cdot 10^{-7} h} , \quad (9)$$

где  $\varphi$  – широта места;  $h$  – высота над уровнем моря, м;  $P_0$  – атмосферное давление у поверхности Земли, Па.

Точность определения гидростатической задержки радиосигнала определяется точностью информации об атмосферном давлении и составляет 2,3 мм/гПа.

Отображающая функция по определению равна:

$$m_d = \frac{\Delta L_d}{\Delta L_d^{90^\circ}} = \frac{\int_0^L \rho dl}{\int_0^\infty \rho dz} . \quad (10)$$

Ифадисом [Ifadis, 1986] получена эмпирическая зависимость, применяемая в диапазоне углов места от 90 до 5° (при  $\beta = 5^\circ$  среднеквадратическая ошибка определения задержки составляет 2,2 см):

$$m_d = \frac{1}{\sin \beta + \frac{a_d}{\sin \beta + \frac{b_d}{\sin \beta + c_d}}} , \quad (11)$$

где  $a_d = 1,237 \cdot 10^{-3} + 1,316 \cdot 10^{-9}(P_0 - 10^5) + 1,378 \cdot 10^{-6}(T_0 - 288,15) + 8,057 \cdot 10^{-7} \sqrt{e_0}$ ;  
 $b_d = 3,333 \cdot 10^{-3} + 1,946 \cdot 10^{-9}(P_0 - 10^5) + 1,040 \cdot 10^{-7}(T_0 - 288,15) + 1,747 \cdot 10^{-8} \sqrt{e_0}$ ;  
 $c_d = 0,078$ ;  $T_0$  – приземная температура воздуха, К;  $e_0$  – приземное значение парциального давления водяного пара, Па.

Таким образом, гидростатическая часть задержки радиосигнала может быть рассчитана по формулам (6), (9), (11) с использованием приземных значений атмосферного давления  $P_0$ , температуры  $T_0$  и влажности  $e_0$  воздуха.

**Задержка радиосигнала во влажном воздухе**

При прохождении сигнала через атмосферу, содержащую водяной пар, возникает задержка радиосигнала, равная:

$$\Delta L_v = \Delta L_v^{90^\circ} m_v . \tag{12}$$

Здесь  $\Delta L_v^{90^\circ}$  – задержка радиосигнала в водяном паре при вертикальном распространении;  $m_v$  – отображающая функция, зависящая от угла места навигационного спутника  $\beta$ .

Для расчета задержки сигнала при вертикальном распространении, обусловленной наличием водяного пара в атмосфере, необходимо интеграл представить в виде:

$$\Delta L_v^{90^\circ} = \int_0^\infty \left( k'_2 R_v + \frac{k_3 R_v}{T} \right) \rho_v dz = \left( k'_2 R_v + \frac{k_3 R_v}{T_m} \right) \int_0^\infty \rho_v dz , \tag{13}$$

где  $T_m$  – "взвешенное" значение температуры воздуха, К.

Поскольку интегральное содержание водяного пара в столбе воздуха определяется выражением  $PWV = \int_0^\infty \rho_v dz$ , то из (13) получается:

$$\Delta L_v^{90^\circ} = \left( k'_2 R_v + \frac{k_3 R_v}{T_m} \right) PWV . \tag{14}$$

Так как по определению параметр  $T_m$  равен [Davis, 1985]:

$$T_m = \frac{\int_0^\infty \frac{e}{T} dz}{\int_0^\infty \frac{e}{T^2} dz} , \tag{15}$$

то значения данного параметра определяются вертикальным распределением влажности и сильно зависят от приземной температуры воздуха. На основе ста-

тистической обработки данных радиозондирования может быть получена статистическая зависимость:

$$T_m = a + bT_0, \quad (16)$$

где  $a, b$  – коэффициенты линейной аппроксимации;  $T_0$  – приземная температура воздуха (на высоте 2 м), К.

В настоящее время широко используются значения коэффициентов  $a = 70,2$  К и  $b = 0,72$ , которые получены по данным аэрологического зондирования над территорией США в диапазоне широт от 27 до 65° с.ш. [Bevis, 1992]. Однако для других регионов земного шара коэффициенты аппроксимации имеют отличные значения. Для примера на рис. 3 представлена зависимость параметра  $T_m$  от приземной температуры воздуха  $T_0$  для Санкт-Петербурга. Нами был осуществлен расчет коэффициентов  $a$  и  $b$  для некоторых пунктов на территории России. Результаты этих расчетов представлены в табл. 1. Анализ данных показал, что использование аппроксимации (16) дает относительную ошибку определения интегрального содержания водяного пара не более чем на 1 %, и использование адаптированных к региону коэффициентов  $a$  и  $b$  повышает точность незначительно.

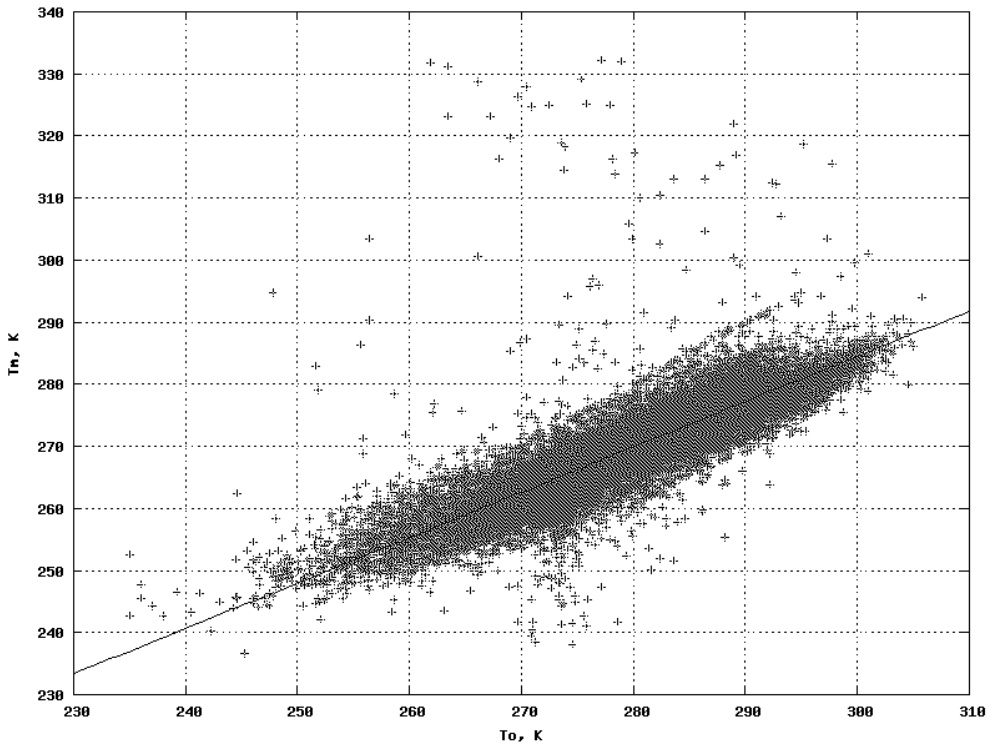


Рис. 3. Зависимость параметра  $T_m$  от приземной температуры воздуха  $T_0$  для Санкт-Петербурга

**Коэффициенты аппроксимации для различных пунктов России**

Пункт	$a$ , К	$b$
Санкт-Петербург	$65,48 \pm 0,83$	$0,73 \pm 0,01$
Бологое	$63,28 \pm 1,01$	$0,74 \pm 0,01$
Великие Луки	$76,23 \pm 0,91$	$0,70 \pm 0,01$
Казань	$67,35 \pm 0,80$	$0,72 \pm 0,01$
Смоленск	$67,39 \pm 0,89$	$0,73 \pm 0,01$
Тура	$107,23 \pm 0,95$	$0,58 \pm 0,01$
Ванавара	$100,74 \pm 1,07$	$0,60 \pm 0,01$
Вилуйск	$95,65 \pm 0,80$	$0,62 \pm 0,01$
Оленек	$109,16 \pm 0,90$	$0,57 \pm 0,01$

Задержка радиосигнала во влажном воздухе зависит в первую очередь от значений интегрального содержания водяного пара ( $0,6 \text{ мм/кг/м}^2$ ) и в меньшей мере от приземного значения температуры воздуха ( $0,5 \text{ мм/К}$ ).

Отображающая функция, показывающая зависимость задержки сигнала во влажном воздухе от угла места спутника, может быть определена по формуле Ифадиса [Ifadis, 1986]:

$$m_v = \frac{1}{\sin \beta + \frac{a_v}{\sin \beta + \frac{b_v}{\sin \beta + c_v}}}, \quad (17)$$

где  $a_v = 5,236 \cdot 10^{-4} + 2,471 \cdot 10^{-9}(P_0 - 10^5) + 1,724 \cdot 10^{-7}(T_0 - 288,15) + 1,328 \cdot 10^{-6} \sqrt{e_0}$  ;  
 $b_v = 1,705 \cdot 10^{-3} + 7,384 \cdot 10^{-9}(P_0 - 10^5) + 3,767 \cdot 10^{-7}(T_0 - 288,15) + 2,147 \cdot 10^{-6} \sqrt{e_0}$  ;  
 $c_v = 0,05917$ .

**Определение интегрального содержания водяного пара в атмосфере**

Интегральное содержание водяного пара может быть определено из результатов измерений "влажной" задержки радиосигнала в тропосфере и отображающей функции  $m_v$  :

$$PWW = \frac{\Delta L_v}{\left( k'_2 R_v + \frac{k_3 R_v}{T_m} \right) m_v}, \quad (18)$$

где  $PWW$  – содержание водяного пара в вертикальном столбе атмосферы,  $\text{кг/м}^2$  или мм. Использование данного соотношения возможно при достаточно боль-

ших углах места спутников, когда отображающая функция дает достаточную точность.

Задержка радиосигнала во влажном воздухе определяется выражением:

$$\Delta L_v = L_1 - L - \Delta L_{ion} - \Delta L_d, \quad (19)$$

где  $L_1$  – результат измерения радиоприемным устройством дальности до навигационного спутника в диапазоне частот  $L_1$ , м;  $L$  – геометрическое расстояние между навигационным спутником и приемным устройством, м;  $\Delta L_{ion}$  – задержка радиосигнала в ионосфере, м;  $\Delta L_d$  – гидростатическая часть задержки радиосигнала в тропосфере, м.

Геометрическое расстояние от передающей антенны спутника до антенны приемного устройства может быть определено из формулы:

$$L = \sqrt{(X_s - X_r)^2 + (Y_s - Y_r)^2 + (Z_s - Z_r)^2}, \quad (20)$$

где  $X_s, Y_s, Z_s$  – декартовы координаты навигационного спутника, м;  $X_r, Y_r, Z_r$  – декартовы координаты приемного устройства, м.

В случае измерения дальности до навигационного спутника в двух диапазонах частот ионосферная задержка радиосигнала может быть определена по формуле:

$$\Delta L_{ion} = \frac{f_2^2(L_2 - L_1)}{f_1^2 - f_2^2}, \quad (21)$$

где  $L_2$  – результат измерения радиоприемным устройством дальности до навигационного спутника в диапазоне частот  $L_2$ , м;  $f_1, f_2$  – несущие частоты навигационного радиосигнала в диапазонах  $L_1$  и  $L_2$  соответственно, Гц.

Для определения ионосферной задержки радиосигнала в случае одновременных измерений в диапазоне  $L_1$  может быть использована формула:

$$\Delta L_{ion} = \frac{-40,4TEC}{f_1^2 \left[ 1 - \left( \frac{R \cos \beta}{R + z_{max}} \right)^2 \right]^{0,5}}, \quad (22)$$

где  $TEC$  – интегральное содержание электронов в вертикальном столбе ионосферы, м<sup>2</sup>;  $R$  – радиус кривизны Земли, в среднем равный 6 371 221 м;  $z_{max}$  – высота расположения максимума концентрации электронов в ионосфере, принимаемая при расчетах равной 432 500 м.

Гидростатическая часть тропосферной задержки определяется по формуле:



$$\Delta L_d = \frac{2,2768 \cdot 10^{-5} P_0 m_d}{1 - 2,66 \cdot 10^{-3} \cos 2\varphi - 2,8 \cdot 10^{-7} h} \quad (23)$$

Таким образом, при зондировании атмосферы ГНСС-сигналами для определения интегрального содержания водяного пара в вертикальном столбе атмосферы  $PWV$  необходимы результаты измерения ГНСС-приемником значений дальности до навигационного спутника, результаты расчета геометрической дальности до спутника, ионосферной задержки и гидростатической части тропосферной задержки радиосигнала, для расчета которой необходима информация о приземных значениях температуры воздуха  $T_0$ , атмосферного давления  $P_0$  и парциального давления водяного пара  $e_0$  в точке размещения ГНСС-приемника.

На рис. 4 представлен временной ход ошибок определения интегрального содержания водяного пара, определенный по результатам сопоставления данных моделирования распространения радиосигнала в тропосфере с данными аэрологического зондирования в п. Воейково за период с января по май 2009 г. Сопоставление проводилось при двух значениях средней квадратической ошибки определения "влажной" части тропосферной задержки радиосигнала: 0,1 и 0,4 м.

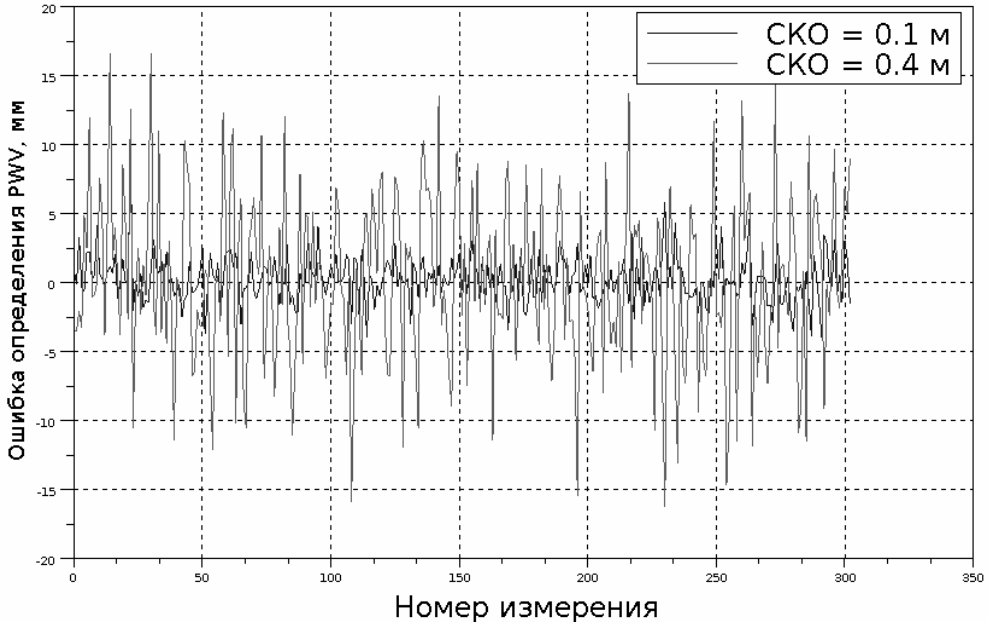


Рис. 4. Точность определения интегрального содержания водяного пара в атмосфере (Санкт-Петербург, январь–май 2009 г.)

Из рис. 4 видно, что при ошибке определения задержки радиосигнала во влажном воздухе, равной 0,4 м, в летние месяцы года относительная ошибка определения содержания водяного пара в атмосфере не превышает 20 %.

### **Заключение**

Как показано, рассмотренный метод позволяет с достаточной для практики точностью определять весьма важную информацию о содержании водяного пара в атмосфере. Оперативность данного метода, полная автоматизация и отсутствие расходных материалов при осуществлении дистанционного зондирования открывают возможности к широкому внедрению данного метода в практику оперативного контроля за состоянием атмосферы. К достоинствам метода можно также отнести "всепогодность" (независимость от наличия облаков), которая выгодно отличает его от методов, основанных на регистрации собственного электромагнитного излучения атмосферы.

*Работа выполнена при поддержке ФЦП "Кадры" (ГК № П1549).*

### **Литература**

1. *Bevis M., Businger S., Herring T.A., Rocken C., Anthes R.A., Ware R.H.* GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning system // *J. Geophys. Res.*, 1992, 97, 15787–15801.
2. *Boudouris G.* On the index of refraction of air, the absorption and dispersion of centimeter waves by gases // *J. Res. of the National Bureau of Standards*, 1963, 67D(6), p. 631–684.
3. *Davis J.L., Herring T.A., Sharipo I.I., Rogers A.E.E., Elgered G.* Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length // *Radio Science*, 1985, 20(6), 1593–1607.
4. *Ifadis I.* The Atmospheric Delay of Radio Waves: Modeling the Elevation Dependence on a Global Scale, Technical Report no. 38L, School of Electrical and Computer Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1986.
5. *Smith E.K., Weintraub S.* The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies. in *Proceedings of Proc. IRE* 41, 1953, p. 1035–1037.
6. *Thayer G.D.* An improved equation for the radio refractive index of air // *Radio Science*, 1974, 9(10), p. 803–807.