

УДК 537.876:551.51

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ АТМОСФЕРНОГО ВОДЯНОГО ПАРА НА ФАЗОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

В. В. Калинин, О. Г. Хуторова, Г. М. Тептин

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Представлены результаты экспериментального исследования горизонтальных градиентов интегрального содержания атмосферного водяного пара, полученных по фазовым измерениям сигналов в сети приёмников глобальных навигационных спутниковых систем в Республике Татарстан в 2011 году. Обнаружен сезонный ход градиентов. Меридиональный градиент, как правило, показывает убывание влагосодержания с возрастанием широты и в среднем за месяц равен $-1,8$ мм осаждаемой воды на 100 км в августе и $0,1$ мм на 100 км в декабре. Зональный среднемесячный градиент по абсолютным значениям несколько меньше меридионального и равен $0,1$ мм на 100 км в марте и июне и $-0,8$ мм на 100 км в мае и октябре. Мгновенные значения градиентов могут на порядок превышать среднемесячные величины. Показано, что вклад градиента интегрального влагосодержания в разность фазовых измерений между двумя антеннами, разнесёнными на расстояние 30 км, для зенитных углов 80° достигает максимума $141,5$ мм в августе. Ошибки в определении взаимного расположения наземных антенн глобальных навигационных спутниковых систем, вызванные градиентами влагосодержания, могут достигать 66 мм в августе и $16,9$ мм в феврале.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что индекс рефракции дециметровых радиоволн в атмосфере существенно зависит от давления и температуры сухого воздуха и давления водяного пара [1]. Радиосигналы глобальных навигационных спутниковых систем, используемые для определения положения приёмных антенн на поверхности Земли, подвержены рефракции в атмосфере, что, с одной стороны, снижает точность получаемых из измерений результатов, а с другой — позволяет использовать наземные сети приёмников таких систем для дистанционного зондирования тропосферы [2–5]. В исследованиях, посвящённых данной проблеме, принято использовать величину интегрального влагосодержания — параметр, характеризующий количество водяного пара в атмосферном столбе [6]. Единицами измерения этого параметра служат миллиметры (или килограммы) осаждаемой воды. Эта величина испытывает значительные сезонные и синоптические вариации. Кроме того, интегральное влагосодержание пространственно-неоднородно [6], что приводит к неоднородностям атмосферного индекса рефракции радиоволн.

Наземные приёмные антенны глобальных навигационных спутниковых систем используют радиосигналы, транслируемые спутниками, для расчёта взаимного расположения приёмников. Эта задача решается с помощью нахождения разности фаз пришедших от спутников радиосигналов [7]. Влияние поля интегрального влагосодержания на полученные результаты будет зависеть как от горизонтальных градиентов этого поля, так и от длины и азимута базовой линии, соединяющей две приёмные антенны.

По коротким измерительным сессиям (с длительностью $0,5 \div 1$ ч), обычно применяемым на практике, фактически невозможно оценить ни интегральное влагосодержание, ни его градиенты [8]. Вместе с тем существуют постоянно действующие сети станций глобальных навигационных спутниковых систем, записывающие результаты измерений в круглосуточном режиме. Данные, собранные такими сетями за суточный и более длительный период, можно использовать для нахождения искомых величин.

Целью данной работы является определение градиентов поля интегрального влагосодержания по фазовым измерениям Сети высокоточного позиционирования Республики Татарстан [9], а также оценка вызываемых ими ошибок в расчётах взаимного расположения антенн приёмников.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

Спутники навигационных систем излучают сигналы на несущих частотах дециметрового диапазона: приблизительно 1,2 и 1,5 ГГц [7]. При распространении через различные атмосферные слои эти сигналы испытывают рефракцию. Для нейтральных газов индекс рефракции N , связанный с коэффициентом преломления n , представляется в виде [10]

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = 77,6890 \frac{P[\text{мбар}]}{T[\text{К}]} + 71,2952 \frac{e[\text{мбар}]}{T[\text{К}]} + 375\,463 \frac{e[\text{мбар}]}{(T[\text{К}])^2}, \quad (1)$$

где P — давление сухого воздуха, T — температура воздуха, e — давление водяного пара.

Параметром, характеризующим воздействие нейтральной атмосферы на радиосигналы со спутников, принято считать зенитную тропосферную задержку (ZTD), которая определяется как [8, 11]:

$$\text{ZTD} = 10^{-6} \int_{h_r}^{h_s} N(h) dh. \quad (2)$$

Здесь h_r — высота приёмника, h_s — высота спутника. Таким образом, ZTD показывает, насколько длина фазового пути от спутника до приёмника в вертикальном (зенитном) направлении больше, чем геометрическое расстояние между ними. Поскольку индекс рефракции линейно связан с давлением сухого воздуха и давлением водяных паров, то его можно разделить на две части, одна из которых зависит от полного атмосферного давления, а другая обусловлена только водяным паром. Соответственно, задержка ZTD также может быть представлена в виде суммы так называемых гидростатической (ZHD) и «влажной» (ZWD) задержек [8, 11]:

$$\text{ZTD} = \text{ZHD} + \text{ZWD}. \quad (3)$$

Поскольку радиотрассы от спутников наклонны, на практике измеряют наклонные тропосферные задержки (STD), которые имеют большие значения. Связь наклонных и зенитных задержек зависит от высотного профиля индекса рефракции, однако хорошим приближением является введение картирующих функций m [11]:

$$\text{STD} = \text{ZTD} m(z), \quad (4)$$

где z — зенитный угол. В самом простом случае картирующая функция представляет собой секанс зенитного угла спутника. Однако такое приближение удовлетворительно только для зенитных углов, не превышающих 60° [8]. Для моделирования тропосферных задержек для более низких направлений используют более сложные выражения. Нами было установлено, что для средних широт европейской части России наиболее точной является картирующая функция Мендеса [12, 13].

Зенитная тропосферная задержка может быть оценена из уравнений фазовых измерений следующим образом [7, 14]:

$$\Phi = S + c(dt_r - dt_s) + K\lambda - I + \text{ZTD} m(z) + \varepsilon, \quad (5)$$

где Φ — фазовый путь, S — геометрическая дальность между приёмником и спутником, c — скорость света в вакууме, dt_r — ошибка хода часов приёмника, dt_s — ошибка хода часов спутника, K — фазовая неоднозначность в циклах, λ — длина несущей волны, I — фазовая ионосферная задержка радиосигналов, ZTD — зенитная тропосферная задержка, $m(z)$ — картирующая функция, ε — прочий шум фазовых измерений. Ионосферную задержку мы исключаем, составляя линейную комбинацию из фазовых измерений, сделанных для одного и того же спутника на двух несущих частотах [7, 15]. Далее составляются двойные разности уравнений (5): сначала разности между измерениями приёмника одновременно до двух спутников, затем разности для соседних моментов времени — первые позволяют исключить ошибку часов приёмника, вторые — фазовые неоднозначности. Для вычисления протяжённости трассы спутник–приёмник необходимо знать точные значения координат и ошибок часов спутников; их можно получить из данных Всемирной службы глобальных навигационных спутниковых систем [16]. Система уравнений, составленная из измерений по всем видимым синхронно спутникам, решается относительно зенитной тропосферной задержки с использованием фильтрации Калмана [17].

Получаемые таким образом ряды ZTD преобразуются в ряды интегрального влагосодержания. При известном атмосферном давлении по модели Саастамойнена можно оценить гидростатическую составляющую тропосферной задержки [11]. Вычитая гидростатическую часть из полной задержки, мы получаем «влажную» компоненту. Дальнейшее преобразование «влажной» задержки в интегральное влагосодержание проводится по процедуре, описанной в [8]. Примеры временных рядов полной и гидростатической задержек, а также соответствующего годового хода интегрального влагосодержания, полученных с шагом 5 мин для 2011 года, показаны на рис. 1 и 2. В работах [8, 14] показано, что абсолютная погрешность определения интегрального влагосодержания по измерениям сигналов глобальных навигационных спутниковых систем составляет 1,5 мм.

2. РАСЧЁТ ГРАДИЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНОГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ

Вычисление рядов интегрального влагосодержания осуществлялось по измерениям радиосигналов, собранным за 2011 год приёмниками Сети высокоточного позиционирования Республики Татарстан [9]. Данные приёмники покрывают область с протяжённостью примерно 300 км по линии восток–запад и 100 км по линии север–юг. Средняя точка сети имеет координаты $55,54^\circ$ с. ш. и $50,99^\circ$ в. д. Приземные значения температуры и давления, необходимые для преобразования ZTD в интегральное влагосодержание, были взяты из численных погодных полей NCEP/NCAR [18].

Для измеренных на каждой станции значений интегрального влагосодержания можно составить уравнения вида

$$IWV(x, y) = IWV(x_0, y_0) + \frac{\partial IWV}{\partial x}(x - x_0) + \frac{\partial IWV}{\partial y}(y - y_0), \quad (6)$$

где x и y — координаты станции в северном и восточном направлении соответственно, $IWV(x, y)$ — измеренное на станции значение интегрального влагосодержания, x_0 и y_0 — координаты средней точки сети, $\partial IWV/\partial x$ и $\partial IWV/\partial y$ — меридиональный и зональный градиенты IWV соответственно. Уравнения составляются для значений IWV , измеренных одновременно на всех станциях, и решаются совместно методом наименьших квадратов. Таким образом определяются средние для сети значения градиентов и интегральное влагосодержание. Точность этих величин оценивается по среднеквадратичному отклонению остаточных разностей.

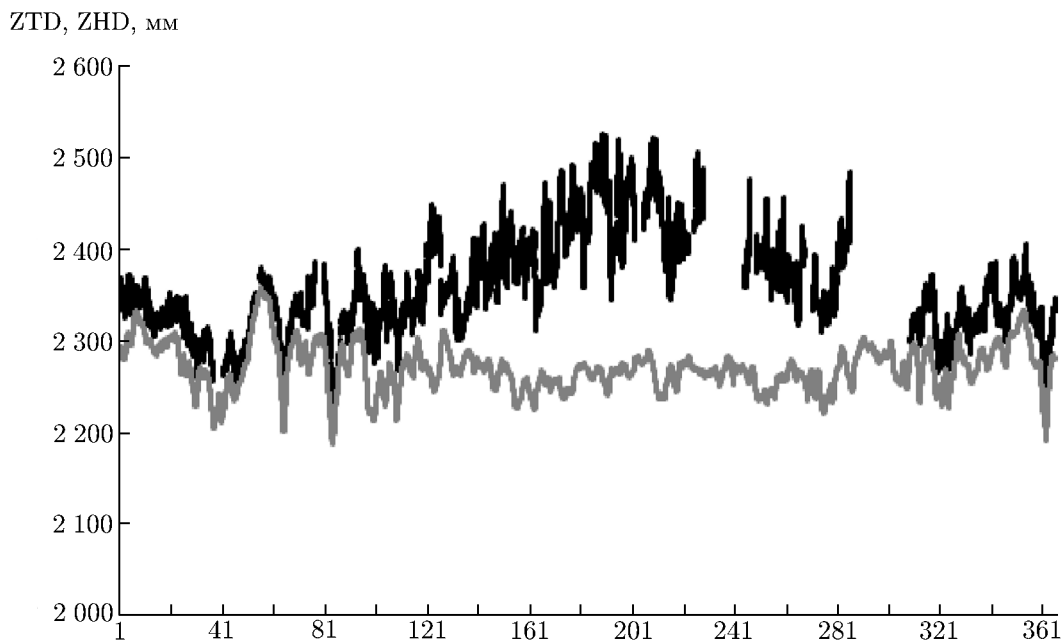


Рис. 1. Полная тропосферная задержка (чёрная кривая) радиосигналов спутниковых систем и её гидростатическая компонента (серая кривая) для г. Альметьевск в зависимости от порядкового номера дня в 2011 году

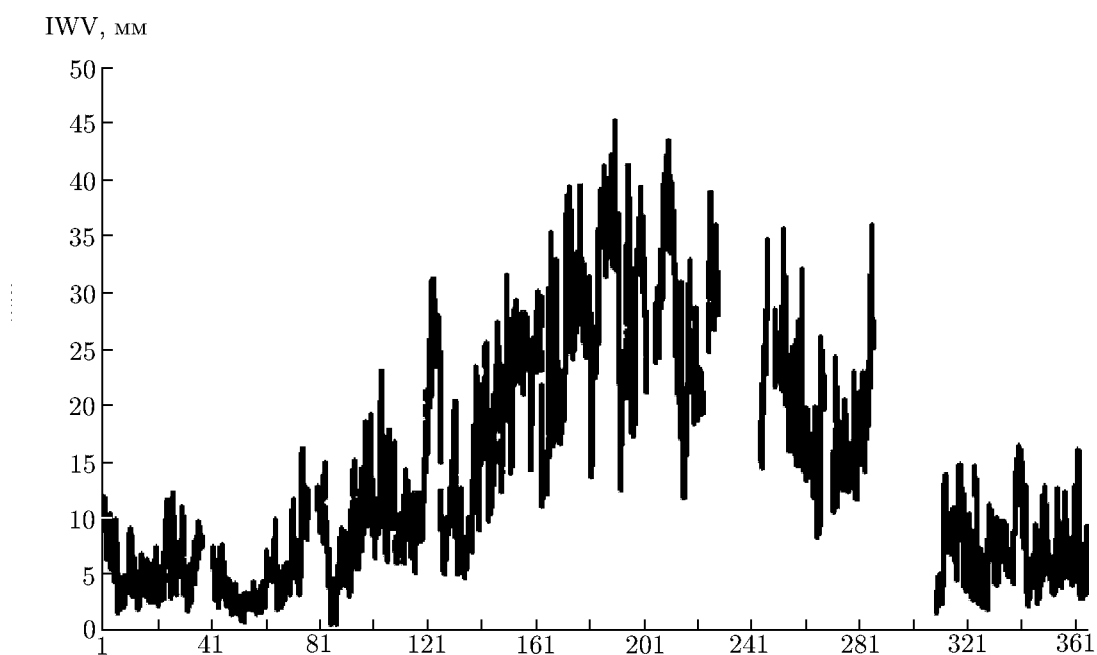


Рис. 2. Интегральное влагосодержание IWV над г. Альметьевск в зависимости от порядкового номера дня в 2011 году

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы провели расчёты средних значений интегрального влагосодержания, средних и максимальных (по модулю) значений горизонтальных градиентов и максимальных пространственных среднеквадратичных отклонений интегрального влагосодержания для каждого месяца 2011 года. Результаты представлены в табл. 1. Как видно из табл. 1, атмосфера была наиболее сухой в феврале, а наиболее влажной — в июле. Меридиональный градиент в холодное время меньше в несколько раз, чем в тёплое время, что естественно в силу малого содержания водяного пара в тропосфере при отрицательных температурах. Наибольшее по модулю значение меридионального градиента достигается в августе, при этом отрицательные величины указывают на общую закономерность распределения интегрального влагосодержания — убывание с возрастанием широты. Максимальные значения градиентов, как правило, значительно превышают среднемесячные. Особенно большие градиенты наблюдаются в период май—август и достигают 7÷12 мм на 100 км. Среднеквадратичное отклонение влагосодержания над рассматриваемой областью показывает, что пространственные флуктуации в тёплое время года в 1,5÷2 раза больше, чем в холодное, что соответствует результатам численного моделирования [4].

Погрешность определения мгновенных меридиональных градиентов находилась в интервале 0,1÷3,4 мм на 100 км и в среднем составила 0,6 мм на 100 км. Для зональных градиентов — 0÷1,6 мм на 100 км и 0,3 мм на 100 км в среднем. При этом наибольшая неоднозначность в оценках градиентов наблюдается летом, наименьшая — зимой. Погрешность оценки меридиональных среднемесячных градиентов варьируется в пределах от 0,005 до 0,020 мм на 100 км, а зональных — от 0,003 до 0,009 мм на 100 км.

Как говорилось выше, для высокоточных радиотехнических измерений важным фактором является влияние градиентов поля интегрального влагосодержания на разность фазовых измерений, выполненных на концах базовой линии. При этом очевидно, что это влияние будет максимальным тогда, когда базовая линия параллельна градиенту поля, т. е. если её азимут A определяется выражением

$$\operatorname{tg} A = \frac{\partial \text{IWV}}{\partial y} / \frac{\partial \text{IWV}}{\partial x}. \tag{7}$$

Таблица 1. Среднемесячные значения, среднемесячные и максимальные по модулю горизонтальные градиенты и максимальные пространственные среднеквадратичские отклонения IWV

месяц	IWV(x_0, y_0), мм	σ_{IWV} , мм	$\partial \text{IWV} / \partial x$, мм/100 км		$\partial \text{IWV} / \partial y$, мм/100 км	
			среднее значение	максимальное значение	среднее значение	максимальное значение
1	5,9	3,5	-0,486 ± 0,006	-3,2 ± 0,3	-0,384 ± 0,003	-3,3 ± 0,2
2	4,0	1,9	-0,355 ± 0,007	-2,7 ± 0,4	-0,286 ± 0,003	-1,7 ± 0,2
3	8,3	3,4	-0,526 ± 0,012	-3,8 ± 0,6	0,122 ± 0,005	2,6 ± 0,3
4	10,9	5,3	-0,732 ± 0,008	-7,0 ± 0,6	-0,209 ± 0,004	5,1 ± 0,4
5	15,9	5,9	-1,383 ± 0,010	-8,6 ± 1,1	-0,786 ± 0,004	-5,5 ± 0,5
6	24,2	5,2	-0,927 ± 0,013	8,9 ± 1,4	0,054 ± 0,006	4,5 ± 0,6
7	26,7	3,6	-1,490 ± 0,019	-7,0 ± 1,0	-0,015 ± 0,009	2,6 ± 0,5
8	21,3	6,7	-1,760 ± 0,020	-12,5 ± 1,0	-0,229 ± 0,009	5,6 ± 0,8
9	20,0	5,4	-0,820 ± 0,010	-5,8 ± 0,7	-0,591 ± 0,005	-5,0 ± 0,5
10	18,1	4,6	0,187 ± 0,012	3,9 ± 0,5	-0,836 ± 0,005	-4,0 ± 0,7
11	7,1	4,0	-0,246 ± 0,005	-2,6 ± 0,5	-0,344 ± 0,002	-3,5 ± 0,4
12	8,3	3,5	0,100 ± 0,007	-4,0 ± 0,5	-0,740 ± 0,003	-3,4 ± 0,4

В этом случае разность в значениях интегрального влагосодержания на концах базовой линии равна

$$\Delta IWV = L \sqrt{\left(\frac{\partial IWV}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial IWV}{\partial y}\right)^2}, \quad (8)$$

где L — расстояние между антеннами. Разности влагосодержаний (9) соответствует разность во «влажных» тропосферных задержках фазовых измерений [8, 11]

$$\Delta ZWD = \left[0,102 + \frac{1708,8}{50,4 + 0,789T[\text{K}]} \right] \Delta IWV, \quad (9)$$

где T — приземная температура. В работе [11] показано, что выражение (10) даёт удовлетворительную точность в средних широтах. На практике обычно используют измерения до спутников с зенитными углами, не превышающими 80° , а длины базовых линий ограничиваются 30 км. Для таких условий мы оценили флуктуации фазы и вклад горизонтального градиента интегрального влагосодержания в разность фазовых измерений приёмников глобальных навигационных спутниковых систем. Измерения выполнены на концах базовой линии для одного и того же спутника, для оценок использовались выражения (4), (9), (10), приземные значения температуры и данные табл. 1. Максимальные в пределах месяца флуктуации фазы и вклад в разности фазовых измерений достигают значений 69,6 и 141,5 мм в августе и 21,5 и 36,3 мм в феврале соответственно. Вклад среднемесячного горизонтального градиента интегрального влагосодержания в разность фазовых измерений в августе составил 18,3 мм, а в феврале — 5,1 мм, что, в свою очередь, вносит вклад в формирование систематической ошибки.

В работе [19] показано, что дополнительная разность фазовых измерений, вызванная тропосферными задержками, в первую очередь влияет на вычисление разности высот антенн, причём коэффициент пропорциональности между ошибками в высотах и разности зенитных тропосферных задержек для средних широт равен 2,59. Мы вычислили эти ошибки для максимальных градиентов на направленных вдоль них базовых линиях с длиной 30 км. Результаты приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, влияние интегрального влагосодержания на фазовые измерения радиосигналов может оказаться существенным для определения взаимного расположения приёмных антенн глобальных навигационных спутниковых систем. Хорошо заметен сезонный тренд — летом возможные ошибки значительно больше, чем зимой.

Таблица 2. Ошибки Δh определения разности высот антенн, обусловленные максимальными градиентами влагосодержания на базовой линии с длиной 30 км

номер месяца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Δh , мм	24,2	16,9	24,0	43,4	49,7	48,3	35,4	66,0	37,4	27,9	22,8	27,1

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были получены среднемесячные значения горизонтальных градиентов поля интегрального влагосодержания атмосферы по фазовым измерениям сигналов глобальных навигационных спутниковых систем, собранным в 2011 году сетью постоянно действующих станций на территории Республики Татарстан. В течение года меридиональный градиент меняется примерно от $-1,8$ мм на 100 км (в августе) до $0,1$ мм на 100 км (в декабре), а зональный градиент — от $0,1$ мм на 100 км (в марте и июне) до $-0,8$ мм на 100 км (в мае и октябре). Меридиональный

градиент в большинстве месяцев отрицателен, что указывает на общее убывание влагосодержания с увеличением географической широты.

Найденные градиенты существенно влияют на разности фазовых измерений и, следовательно, на определение взаимного расположения приёмных антенн навигационных систем. Ошибки при расчётах взаимного расположения могут достигать 66 мм в августе и 16,9 мм в феврале. Полученные результаты представляют интерес для широкого круга задач, использующих высокоточные радиоизмерения в дециметровом диапазоне.

Авторы выражают благодарность Министерству информатизации и связи Республики Татарстан за возможность использования данных Сети высокоточного позиционирования Республики Татарстан.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 13-05-97054).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев О. И. Космическая радиофизика. М.: Научная книга, 1998. 432 с.
2. Naefele P., Martin L., Becker M., et al. // Proc. 17th Int. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, September 21–24, 2004, Long Beach, USA. P. 2 289.
3. Хуторова О. Г., Тептин Г. М., Васильев А. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 1. С. 1.
4. Тептин Г. М., Хуторова О. Г., Зинин Д. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 1. С. 1.
5. Хуторов В. Е., Журавлёв А. А., Тептин Г. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 5. С. 319.
6. Хуторова О. Г., Калинин В. В., Курбангалиев Т. Р. // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 529.
7. Xu G. GPS. Theory, algorithms and applications. Berlin: Springer, 2007. 340 p.
8. Schuler T. On ground-based GPS tropospheric delay estimation: PhD dissertation. Munchen, 2001. 364 p.
9. http://85.233.70.122:8080/geopp_gnweb/gnweb.html.
10. Rueger J. M. Refractive indices of light, infrared and radio waves in the atmosphere. Sydney: UNSW, 2002. 104 p.
11. Mendes V. B. Modeling the neutral-atmospheric propagation delay in radiometric space techniques. Brunswick: UNB, 1999. 353 p.
12. Mendes V. B., Prates G., Pavlis E. C., et al. // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29, No. 10. P. 53.
13. Калинин В. В., Тептин Г. М. // Инж. изыскания. 2012. № 5. С. 26.
14. Калинин В. В., Хуторова О. Г., Тептин Г. М. // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2012. Т. 48, № 6. С. 705.
15. Schaer S. Mapping and predicting Earth's ionosphere using the global positioning system: PhD dissertation. Bern, 1999. 228 p.
16. <http://igscb.jpl.nasa.gov/components/usage.html>.
17. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана—Бьюси. М.: Наука, 1982. 200 с.
18. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., et al. // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. V. 77, No. 3. P. 437.
19. Santerre R. GPS satellite sky distribution: impact on the propagation of some important errors in precise relative positioning. Brunswick: UNB, 1989. 203 p.

Поступила в редакцию 12 февраля 2013 г.; принята в печать 28 февраля 2013 г.

**INFLUENCE OF THE ATMOSPHERIC WATER-VAPOR FIELD IRREGULARITY
ON THE PHASE MEASUREMENTS OF RADIO SIGNALS FROM GLOBAL
NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS**

V. V. Kalinnikov, O. G. Khutorova, and G. M. Tepin

In this paper, we present the experimental-study results for the horizontal gradients of the integral content of atmospheric water vapor, which were obtained from the phase measurements of signals in the receiver network of the global navigation satellite systems in 2011 in the Republic of Tatarstan. The seasonal gradient variation is found. The meridional gradient usually shows a moisture-content decrease with increasing latitude and its monthly averages are equal to -1.8 mm and 0.1 mm of precipitated water per 100 km in August and December, respectively. The zonal monthly average gradient is somewhat smaller than the meridional one by absolute value and equals 0.1 mm and -0.8 mm per 100 km in March/June and May/October, respectively. Instantaneous values of the gradients can by an order of magnitude exceed the monthly average values. Contribution from the integral moisture-content gradient to the phase-measurement difference between two antennas spaced at 30 km is shown to attain its maximum 141.5 mm in August for the zenith angles 80° . Errors in determining the mutual location of the ground-based antennas of the global navigation satellite systems due to moisture content can reach 66 mm and 16.9 mm in August and February, respectively.