

## Вариации задержки сигналов GPS/ГЛОНАСС в атмосфере по данным моделирования и спутниковой микроволновой радиометрии

М.Л. Митник, Л.М. Митник

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН  
690041, Владивосток, Балтийская, 43  
E-mail: maia@poi.dvo.ru*

Рассмотрена связь задержки сигналов GPS и ГЛОНАСС с вариациями метеорологических характеристик атмосферы. Влажная составляющая задержки пропорциональна паросодержанию атмосферы  $V$ , а облачная составляющая — водозапасу облаков  $Q$ . Значения  $V$  над океаном могут быть найдены по измерениям спутниковых микроволновых радиометров SSM/I, AMSR-E, TMI, AMSU-A и других, а над прибрежной зоной и материками — по измерениям задержки сигналов на сети приемных станциях GPS и ГЛОНАСС. Приведены поля влажной и облачной составляющих задержки в тропическом и внетропическом циклонах над Тихим океаном, рассчитанные по полям  $V$  и  $Q$ , найденным по данным AMSR-E со спутника Aqua. Отмечены приложения данных о полях  $V$ , восстановленных по данным сети GPS и ГЛОНАСС.

**Ключевые слова:** GPS, ГЛОНАСС, влажная и облачная составляющие задержки, паросодержание атмосферы, водозапас облаков, алгоритмы, AMSR-E, Aqua, тропические и внетропические циклоны.

### Введение

Новым источником данных о паросодержании атмосферы  $V$  стали измерения времени задержки сигналов, излучаемых со спутников глобальных навигационных систем Global Position System (GPS) и ГЛОНАСС и принимаемых наземными станциями. Величина задержки  $\Delta t$  (электрической длины пути — ЭДП —  $\Delta L = \Delta t \cdot c$ , где  $c$  — скорость распространения электромагнитных волн в вакууме) на траектории  $l$  распространения сигналов GPS от спутника до приемной станции зависит от профиля коэффициента преломления атмосферы  $n(l)$ . Вариации  $n(l)$  определяются вариациями высотных профилей давления  $P(h)$ , температуры  $T(h)$  и влажности атмосферы  $a(h)$ , концентрации крупных (дождь) и мелких (облака) капель, а также вариациями количества электронов в ионосфере  $N_e(h)$ , что позволяет представить  $\Delta L$  в виде суммы сухой  $\Delta L_{\text{сух}}$ , влажной  $\Delta L_{\text{вл}}$ , облачной  $\Delta L_{\text{обл}}$  и ионосферной  $\Delta L_{\text{ион}}$  составляющих. Сухая составляющая может быть рассчитана по вертикальным профилям давления  $P(l)$  и температуры  $T(l)$  воздуха. Влажная составляющая определяется содержанием водяного пара в толще атмосферы (её паросодержанием)  $V$ , но зависит также от распределения температуры  $T(h)$ . Облачная составляющая пропорциональна водозапасу облаков  $Q$ , зависит от температуры капелек и существенно меньше сухой и влажной составляющих (Бин, Даттон, 1971; Кутуза, 1974).

Поля паросодержания атмосферы  $V$  и водозапаса облаков  $Q$  над океаном восстанавливаются по спутниковым микроволновым измерениям яркостной температуры  $T_{\text{я}}$  (Mitnik, Mitnik, 2003; Митник, Митник, 2006), что позволяет определить ЭДП  $\Delta L = \Delta L_{\text{вл}} + \Delta L_{\text{обл}}$  по экспериментальным данным, а  $\Delta L_{\text{сух}}$  рассчитать по полям давления и температуры атмосферы у поверхности океана. Карты этих полей выпускаются в основные синоптические сроки Европейским центром среднесрочных прогнозов (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts — ECMWF), а также региональными центрами: Японской метеорологической ассоциацией JMA, Корейской метеорологической администрацией и др. В прибрежной зоне моря шириной в несколько десятков километров на  $T_{\text{я}}$ , измеряемые спутниковыми микроволновыми радиометрами, оказывает влияние излучение материковых покровов, что приводит к погрешностям в оценках  $V$  и  $Q$ , а, следовательно, и в  $\Delta L$ , которые растут с уменьшением расстояния до берега. В прибрежной зоне и над материками оценка ЭДП может быть

выполнена по данным радиозондирования атмосферы. Количество радиозондовых станций, однако, невелико, что не позволяет отслеживать пространственные вариации задержки. Временное разрешение также мало: радиозонды выпускают, как правило, два раза в сутки.

Сеть островных, береговых и материковых приемных станций GPS в сочетании с сетью радиозондовых станций позволяет построить поле задержки и над сушей, и над прибрежной зоной, где наблюдается существенная трансформация поля влажности. Высокое временное разрешение данных GPS (5 мин) обеспечивает квазисинхронность оценок значений  $V$  по данным спутниковых микроволновых измерений и GPS, а также возможность их привязки к данным радиозондирования атмосферы 2–4 раза в сутки.

В работе представлены результаты анализа вариаций электрической длины пути и отдельных ее составляющих, рассчитанные по данным радиозондирования атмосферы с судов и островных станций в различных районах Мирового океана. Показана высокая корреляция влажной и облачной компонент ЭДП с интегральными параметрами атмосферы  $V$  и  $Q$ . По полям  $V$  и  $Q$  над океаном, восстановленным по яркостным температурам, измеренным радиометром AMSR-E со спутника Aqua, построены поля атмосферной задержки в различных морских погодных системах.

### Основные соотношения

Отличие коэффициента преломления воздуха  $n$  от единицы приводит к фазовому запаздыванию радиоволн, величина которого зависит от метеорологических параметров вдоль направления распространения и от длины волны  $\lambda$ . Фазовое запаздывание прямо пропорционально электрической длине пути  $\Delta L$ , которая представляет собой разность между фазовым путем и геометрическим расстоянием

$$\Delta L = \int_L [n(l) - 1] dl, \quad (1)$$

где  $L$  — длина пути радиоволн.  $\Delta L$  можно представить в виде суммы «сухой», «влажной» и «облачной» компонент:

$$\Delta L = \Delta L_{\text{сух}} + \Delta L_{\text{вл}} + \Delta L_{\text{обл}}, \quad (2)$$

которые на частотах  $\nu < 50$  ГГц могут быть вычислены по следующим формулам (Бин, Даттон, 1971; Кутуза, 1974; Митник, 1973):

$$\Delta L_{\text{сух}} = 7,76 \cdot 10^{-5} \int_L \frac{P(l)}{T(l)} dl, \quad (3)$$

$$\Delta L_{\text{вл}} = 0,373 \int_L \frac{e(l)}{T^2(l)} dl, \quad (4)$$

$$\Delta L_{\text{обл}} = 1,5 \cdot 10^{-7} \int_L a_\lambda [T(l)\omega(l)] dl, \quad (5)$$

где  $T$  — температура воздуха (в К);  $P$  и  $e$  — давление и влажность воздуха (в мб);  $a_\lambda$  — коэффициент, зависящий от диэлектрической проницаемости воды;  $\omega$  — водность облаков (в г/м<sup>3</sup>).

Сухая составляющая  $\Delta L$  в направлении зенита  $\Delta L_{\text{сух}}$  составляет 220...235 см и с высокой точностью может быть рассчитана по значениям давления  $P(0)$  и температуры  $T(0)$  воздуха у земной поверхности. Влажная составляющая  $\Delta L_{\text{вл}}$  зависит от высотных профилей влажности и температуры воздуха. В отличие от  $\Delta L_{\text{сух}}$  погрешность оценки  $\Delta L_{\text{вл}}$  по приземным

значениям  $e(0)$  и  $T(0)$  может достигать 10 см (Hopfield, 1971). Вариации  $\Delta L_{\text{вл}}$  в направлении зенита лежат в пределах от 1...2 см (сухой арктический воздух) до 35...40 см (влажный тропический воздух) и в существенной степени определяются вариациями паросодержания атмосферы  $V$  (Митник, 1973)

$$\Delta L_{\text{вл}} = \frac{1,72 \cdot 10^3}{T(0)} V(1 + \beta), \quad (6)$$

где  $\beta$  — коэффициент, зависящий от вертикальных профилей температуры и влажности.

Облачная составляющая ЭДП  $\Delta L_{\text{обл}}$ :

$$\Delta L_{\text{обл}} = 1,5 \cdot 10^{-7} a_{\lambda}(T_{\text{эф}}) Q, \quad (7)$$

где  $T_{\text{эф}}$  — эффективная температура капелек воды в облаках, которая определяется вертикальными профилями водности и температуры.

Облачная составляющая пропорциональна водозапасу облаков  $Q$  и существенно меньше сухой и влажной составляющих. Облачность является диспергирующей средой для радиоволн. На частотах  $\nu < 30$  ГГц  $\Delta L_{\text{обл}} = 0,16...0,18$  см для облаков с  $Q = 1$  кг/м<sup>2</sup>. Зависимость от температуры в диапазоне от  $-15$  до  $+20$  °C выражена незначительно.

### Моделирование атмосферной задержки

Для моделирования атмосферной задержки была использована база данных, созданная на основе 2050 наборов радиозондовых, метеорологических и гидрологических измерений, выполненных на судах Дальневосточного научно-исследовательского гидрометеорологического института и на японском судне «Кейфу Мару» в Тихом и Индийском океанах. Данные радиозондирования представляют собой значения давления  $P(h_i)$ , температуры  $T(h_i)$  и относительной влажности атмосферы  $U(h_i)$  и скорости ветра  $W(h_i)$  на нескольких десятках уровней  $i = 1, 2, \dots, n$  от минимального уровня над поверхностью моря до максимального (20...35 км). При построении профиля водности облаков использовались данные о количестве и типах облаков по судовым наблюдениям и статистические данные о водности. К судовым данным были присоединены 459 наборов измерений, выполненных на островных метеостанциях. Описание базы данных приведено в (Mitnik, Mitnik, 2003; Митник, Митник, 2006).

Для моделирования задержки и её составляющих был подготовлен массив из 2368 точек, в котором температура воздуха у поверхности менялась от  $-1,8$  до  $31$  °C, давление — от 956 до 1034 мб, паросодержание атмосферы от 0,6 до 71 кг/м<sup>2</sup> и водозапас облаков от 0,01 до 2 кг/м<sup>2</sup>. Расчет атмосферной задержки и её составляющих выполнялся путем численного интегрирования соотношений (3)–(5). По расчётным данным были найдены коэффициенты линейной регрессии  $k_0$ – $k_4$  как для суммарной задержки, так и для её составляющих (табл. 1)

$$\Delta L = k_0 + k_1 P(0) + k_2 T(0) + k_3 V + k_4 Q. \quad (8)$$

Анализ расчётного материала показывает, что влажная и облачная составляющие ЭДП могут быть получены с высокой точностью по значениям температуры и влажности воздуха у поверхности моря, паросодержания атмосферы и водозапаса облаков. Влажная составляющая определяется преимущественно величиной паросодержания атмосферы. В тропической зоне, где  $V = 50...70$  кг/м<sup>2</sup>, значения  $\Delta L_{\text{вл}} = 31$ – $43$  см. Влияние вариаций  $T(0)$  и  $P(0)$  на  $\Delta L_{\text{вл}}$ , как следует из расчётов, мало. Заметнее сказываются на изменчивости  $\Delta L_{\text{вл}}$  вариации вертикальных профилей  $T(l)$  и  $P(l)$ , от которых зависит профиль коэффициента преломления воздуха. Задержкой в облачности в большинстве случаев можно пренебречь. Только в мощной

облачности стены глаза и спиральных дождевых рукавов тропических циклонов, в облачности внутритропической зоны конвергенции и муссонов, где значения  $Q$  могут достигать  $3 \dots 5 \text{ кг/м}^2$ , учёт  $\Delta L_{\text{обл}}$  может быть заметным — особенно при улучшении пространственного разрешения.

Таблица 1. Коэффициенты регрессии в уравнениях ЭДП

Коэффициенты регрессии /параметр	$\Delta L$ , см	$\Delta L_{\text{сух}}$ , см	$\Delta L_{\text{вл}}$ , см	$\Delta L_{\text{обл}}$ , см
$k_0$	20,52	24,33	-3,81	0,0
$k_1/P(0)$	0,611	-0,0093	0,00318	0,0
$k_2/T(0)$	0,043	0,0389	0,00412	0,0
$k_3/V$	0,6106	-0,0093	0,62	0,0
$k_4/Q$	1,94	0,338	0,158	0,145
$\sigma$ , см	2,38	2,32	0,25	0,0
R	0,98	0,63	1,0	1,0

Интегральные параметры атмосферы  $V$  и  $Q$  над океаном восстанавливаются по измерениям спутниковых микроволновых радиометров, начиная с 1968 г. Погрешность оценки  $V$  составляет  $1,5 \dots 3 \text{ кг/м}^2$  (что эквивалентно погрешности в  $\Delta L_{\text{вл}}$  в  $1,2 \text{--} 1,8 \text{ см}$ ), возрастая с увеличением водозапаса облаков. Рассмотрим электрическую длину пути в циклонических образованиях.

### Электрическая длина пути в морских погодных системах

Поля парообразной и капельной влаги в атмосфере, восстановленные по данным спутникового микроволнового радиометрического зондирования (Митник, Митник, 2006; Mitnik, Mitnik, 2003) позволяют следить за вариациями влажной и облачной составляющих задержки, опираясь на тесную связь ЭДП с  $V$  и  $Q$ . Температуру воздуха  $T(0)$  в большинстве случаев также можно считать известной: она близка к температуре поверхности воды, которая определяется по спутниковым микроволновым и инфракрасным измерениям (Gentemann et al., 2010a, b). Поле давления  $P(0)$  для оценки  $\Delta L_{\text{сух}}$  может быть взято с глобальных и региональных карт погоды.

На рис. 1 приведены поля паросодержания атмосферы и водозапаса облаков в тропическом циклоне Fanari, центр которого 18 сентября 2010 г. располагался к востоку от Тайваня. Значения  $V$  в области тайфуна варьировали от  $55$  до  $70 \text{ кг/м}^2$ , снижаясь в промежутках между спиральными рукавами до  $42 \dots 50 \text{ кг/м}^2$  (см. рис. 1а). В круговой выделенной белым цветом области, охватывающей центр ТЦ (глаз) и стену глаза, ослабление излучения в осадках и мощной облачности препятствует точной оценке  $V$ , и значение  $V$  принято равным  $70 \text{ кг/м}^2$ . Структура водозапаса облаков прорисовывается на рис. 1б: уверенно выделяются центр ТЦ, мощная облачность в кольце вокруг центра (стена глаза) и в спиральных дождевых рукавах, где  $Q > 1,6 \text{ кг/м}^2$ . Шкалы задержек  $\Delta L_{\text{вл}}$  и  $\Delta L_{\text{обл}}$  приведены ниже шкал  $V$  и  $Q$ . Влажная составляющая  $\Delta L_{\text{вл}}$  варьирует в пределах  $25 \dots 43 \text{ см}$ . Облачная составляющая  $\Delta L_{\text{обл}}$  мала: в диапазоне частот сигналов ГЛОНАСС и GPS она не превышает  $0,3 \text{ см}$ . На частоте  $\nu = 80 \dots 100 \text{ ГГц}$   $\Delta L_{\text{обл}}$  в  $1,5 \dots 2$  раза больше — в зависимости от температуры облачности (Митник, Кухарская, 1977; Митник, 1984).

Рассмотрим задержки во внетропическом циклоне, центр которого в 06:00 Гр. 29 сентября находился над Сахалином, а минимальное давление составляло  $984 \text{ мб}$ . Циклон достиг максимального развития, после чего начал медленно заполняться, смещаясь на восток. На рис. 2 приведены поля паросодержания атмосферы и водозапаса облаков на стадии окклюирования циклона, восстановленные по данным AMSR-E, и значения влажной и облачной

задержек, рассчитанные по  $V$  и  $Q$ . В пределах облачности фронта окклюзии паросодержание атмосферы  $V = 25 \dots 35 \text{ кг/м}^2$ , чему соответствует  $\Delta L_{\text{вл}} \approx 15,5 \dots 22 \text{ см}$ , а значения водозапаса облаков  $Q$  меняются от  $0,7$  до  $1 \text{ кг/м}^2$ . На фоне этих значений выделяется полоса ещё более плотной облачности с  $V \approx 40 \dots 50 \text{ кг/м}^2$  и  $Q \geq 1,5 \text{ кг/м}^2$ , где значения  $\Delta L_{\text{вл}}$  возрастают до  $\sim 25 \dots 32 \text{ см}$ , а облачная составляющая  $\Delta L_{\text{обл}} \geq 0,22 \text{ см}$ . Вдоль внутренней границы фронта окклюзии 1 перепад  $V$  составляет  $18 \dots 20 \text{ кг/м}^2$ , а перепад  $Q$  —  $0,8 \dots 1 \text{ кг/м}^2$ , чему соответствует перепад электрической длины пути в  $11 \dots 13 \text{ см}$ . С облачностью фронта связана и основная зона осадков в северо-восточном секторе циклона. Значения  $V$  в центральной части циклона значительно ниже ( $20 \dots 25 \text{ кг/м}^2$ ), а значения  $Q$  местами достигают  $0,7 \dots 0,9 \text{ кг/м}^2$ .

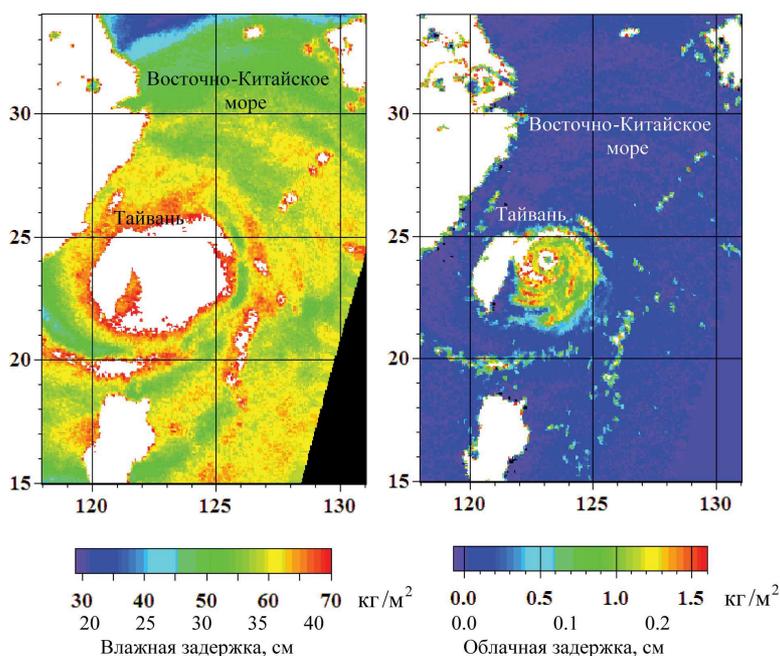


Рис. 1. Поля интегральных параметров атмосферы и соответствующие им составляющие задержки сигналов GPS в области тайфуна Фанари, восстановленные из измерений микроволнового радиометра AMSR-E со спутника Аква 18 сентября 2010 г. в 17:30 Гр

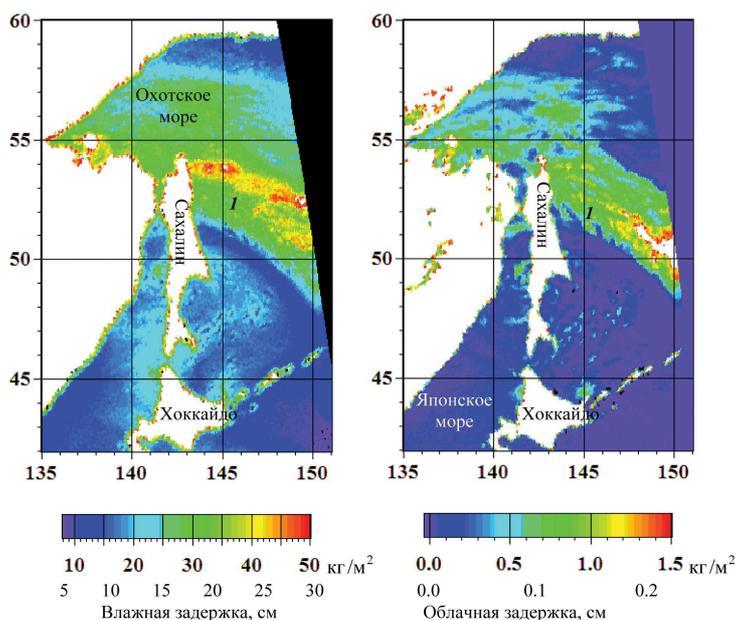


Рис. 2. Поля паросодержания атмосферы (а) и водозапаса облаков (б) и рассчитанные по ним поля влажной (а) и облачной (б) составляющих задержки сигналов GPS во внетропическом циклоне над Охотским морем, восстановленные из измерений радиометра AMSR-E со спутника Аква 29 сентября 2010 г. в 03:35 Гр

## Заключение

Непрерывные измерения задержки на глобальной быстро расширяющейся сети станций GPS/ГЛОНАСС находят всё более широкое применение в метеорологии. Аккуратный учёт ионосферной задержки и сухой составляющей атмосферной задержки позволяет определять значения паросодержания  $V$  с высокой точностью. Так, по данным (Hilburn et al., 2010), стандартное отклонение между значениями  $V$  по спутниковым SSM/I-определениям и измерениям на 13 станциях GPS составило  $1,83 \text{ кг/м}^2$  для примерно 30 000 точек при разнице средних значений  $V_{\text{SSM/I}} - V_{\text{GPS}} = -0,1 \text{ кг/м}^2$ .

Развивается новое направление — GPS-метеорология с многочисленными приложениями. Преимуществом измерений паросодержания на сети GPS является не только точность, но и высокое временное разрешение. В отличие от станций радиозондирования атмосферы, выпускающих 2–4 радиозонда в сутки, значения  $V$  на сети GPS/ГЛОНАСС могут быть найдены с интервалом 5 мин (Gradinarsky, Jarlemark, 2004; Heise et al., 2009). Высокое временное разрешение необходимо для изучения связей изменчивости поля  $V$  с полями облачности и осадков и их краткосрочного прогноза (Van Baelen et al., 2011), для коррекции влияния атмосферы на результаты спутниковой РСА-интерферометрии (Ding et al., 2008), калибровки яркостных температур, измеренных спутниковыми микроволновыми радиометрами, валидации алгоритмов восстановления  $V$  (Sibthorpe et al., 2011) и решения других задач.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 11-05-12047-офи-м-2011), ФЦП «Мировой океан» и соглашения между ТОИ ДВО РАН и Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). Данные измерений AMSR-E со спутника Aqua получены из JAXA.

## Литература

1. Бин Б.Р., Даттон Е.Д. *Радиометеорология* / Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1971. С. 362.
2. Кутуза Б.Г. Фазовое запаздывание радиоволн в неоднородной атмосфере // *Радиотехника и электроника*. 1974. Т. 19. № 4. С. 665–670.
3. Митник Л.М. Использование радиометрических измерений в СВЧ-диапазоне для определения длины группового пути радиоволн в атмосфере // *Радиотехника и электроника*. 1973. № 9. С. 1808–1815.
4. Митник Л.М. Диэлектрическая проницаемость воды: необходимость точных значений для решения задач дистанционного зондирования окружающей среды // *Исслед. Земли из космоса*. 1984. № 3. С. 66–71.
5. Митник Л.М., Кухарская Н.Ф. Возможности оценки полной массы водяного пара в атмосфере по вариациям фазового запаздывания радиоволн // *Межвузовский сб. Вып. 64. Авиационная и космическая метеорология*. Л.: ЛПИ им. М.И. Калинина. 1977. С. 75–78.
6. Митник М.Л., Митник Л.М. Восстановление паросодержания атмосферы и водозапаса облаков над океаном по данным микроволнового зондирования со спутников DMSP, TRMM, AQUA и ADEOS-II // *Исслед. Земли из космоса*. 2006. № 4. С. 34–41.
7. Ding X.-L., Li Z.-W., Zhu J.-J. et al. Atmospheric effects on InSAR measurements and their mitigation // *Sensors*. 2008. V. 8. P. 5426–5448. doi: 10.3390/s8095426.
8. Gentemann C.L., Meissner T. Wentz F.J. (2010a) Accuracy of satellite sea surface temperatures at 7 and 11 GHz // *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*. 2010. V. 48. P. 1009–1018. doi: 10.1109/TGRS.20092030322.
9. Gentemann C.L. et al. (2010b) Passive microwave remote sensing of the ocean: an overview // *Oceanography from Space, revisited* / Eds. Barale V., Gower J., Alberotanza L. Springer, 2010. P. 13–33.
10. Gradinarsky L.P., Jarlemark P. Ground-based GPS tomography of water vapor: Analysis of simulated and real data // *J. Meteorological Soc. Japan*. 2004. V. 82. N. 1B. P. 551–560.
11. Heise S., Dick G., Gendt G. et al. Integrated water vapor from IGS ground-based GPS observations:

- initial results from a global 5-min data set // *Annales de Geophysicae*. 2009. V. 27. P. 2851–2859.
12. Hilburn K. et al. Description of Remote Sensing Systems Version-7 Geophysical Retrievals // *Remote Sensing Systems*. 2010. [Электрон. текст]. Режим доступа: [http://www.ssmi.com/papers/hilburn/Hilburn\\_V7\\_Poster\\_AMS\\_SatMet\\_2010\\_Annapolis.pdf](http://www.ssmi.com/papers/hilburn/Hilburn_V7_Poster_AMS_SatMet_2010_Annapolis.pdf).
  13. Mitnik L.M., Mitnik M.L. Retrieval of atmospheric and ocean surface parameters from ADEOS-II AMSR data: comparison of errors of global and regional algorithms // *Radio Science*. 2003. V. 38. N. 4. P. 8065. doi: 10.1029/2002RS002659.
  14. Sibthorpe A., Brown S., Desai S.D. et al. Calibration and validation of the Jason-2/OSTM Advanced Microwave Radiometer using terrestrial GPS stations // *Marine Geodesy*. 2011. V. 3–4. N. 3–4. P. 420–430. doi: 10.1080/01490419.2011.584839.
  15. Solheim F.S., Vivekanandan J., Ware R.H., Rocken C. Propagation delays induced in GPS signals by dry air, water vapor, hydrometeors, and other particulates // *J. Geophysical Research*. 1999. V. 104. N. D8. P. 9663–9670.
  16. Van Baelen J., Reverdy M., Tridon F. et al. On the relationship between water vapour field evolution and the life cycle of precipitation systems // *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.* 2011. V. 137. P. 204–223.

## Variations of atmospheric delay of GPS/GLONASS signals from satellite microwave radiometer data and modeling

M.L. Mitnik, L.M. Mitnik

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences  
690041, Vladivostok, Baltiyskaya, 43  
E-mail: maia@poi.dvo.ru*

Relationship of GPS and GLONASS signal delay with the variations of meteorological characteristics of the atmosphere is considered. Wet component of the delay is proportional to the total atmospheric water vapour content  $V$  and cloud one – to the total cloud liquid water content  $Q$ .  $V$  and  $Q$  values are retrieved from the measurements of satellite microwave radiometers SSM/I, AMSR-E, TMI, AMSU-A and others. Fields of wet and cloud delays in the tropical and extratropical cyclones over the Pacific Ocean are given. They were computed from  $V$  and  $Q$  fields which were determined from Aqua AMSR-E data. Applications of  $V$ -fields retrieved from GPS/GLONASS receiving station network are marked.

**Keywords:** GPS, GLONASS, wet and cloud delays, total water vapor content, total cloud liquid water content, algorithms, AMSR-E, Aqua, tropical cyclones.