

УДК 550.388.2

МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВ GPS

© 2011 г. В. А. Суроткин, В. В. Клименко, Ю. Н. Кореньков

Учреждение РАН Западное отделение Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, Калининград

e-mail: pcizmiran@gazinter.net

Поступила в редакцию 07.04.2010 г.

После доработки 07.09.2010 г.

Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли (ГСМ ТИП), позволяющая рассчитывать все основные параметры околоземной плазмы, используется для вычисления интегрального электронного содержания (*TEC*). Расчеты выполнены вдоль траектории луча распространения радиосигнала между наземной точкой приема и спутником системы *GPS*. Выполнено сопоставление *TEC*, вычисленного по спутниковым данным, с “истинным модельным” значением *TEC* для магнитоспокойных условий весеннего равноденствия, средней солнечной активности. Рассчитаны относительные ошибки в определении спутникового *TEC* для двух европейских станций Тромс и Калининград и двух станций американского сектора Миллстоун Хилл и Аресибо. Показано, что увеличение количества наблюдаемых спутников не всегда приводит к увеличению точности измеряемого по спутникам значения *TEC*.

ВВЕДЕНИЕ

Основы метода исследования ионосферы с помощью сигналов искусственных спутников Земли (ИСЗ) были представлены в работах [Альперт, 1958, 1960] и непрерывно развивались по мере совершенствования теории и практики наблюдений ИСЗ. Таким образом, использование радиосигналов спутников для изучения состояния ионосферы осуществлялось на протяжении нескольких десятилетий как в России [Альперт и Синельников 1969], так и за рубежом [Titheridge, 1972]. Уже в это время стало возможным определение интегрального содержания электронов по фарадеевскому вращению вдоль луча между приемником, расположенным на земной поверхности, и геостационарным спутником. С развитием спутниковой навигации началась новая эра в исследовании околоземного космического пространства. Развертывание системы спутников Глобальной Системы Позиционирования (*Global Positioning System – GPS*) позволило регулярно в глобальном масштабе получать информацию о состоянии ионосферы. *GPS* используется для изучения таких ионосферных характеристик, как общее электронное содержание (*Total Electron Content – TEC*) [Willson and Mannucci, 1993] и профили электронной концентрации [Найи et al., 1994, 1998; Андрианов и Смирнов, 1993; Смирнов, 2001], ионосферных неоднородностей [Wanninger, 1993], спорадического слоя *E* [Coco et al., 1996], для диагностики геомагнитных возмущений [Афраймович и др., 2002; Афраймович и Перевалова, 2006], прогнозирования состояния ионосферы [Jakowski, 2002] и др. как в спокойное, так и в возмущенное время. Система

GPS является также средством для мониторинга содержания паров воды в тропосфере, что является важным моментом при точном определении задержки радиосигнала в верхней атмосфере Земли. Таким образом, в настоящее время, система *GPS* является мощным инструментом при изучении структуры ионосферы [Klobuchar, 1997; Davies and Hartmann, 1997].

Хотя основной целью *GPS* является обеспечение потребителей точными координатами их местоположения, как на поверхности Земли, так и в воздухе, очень широкое распространение получила техника использования задержек радиосигнала для вычисления *TEC*. В связи с этим было проведено множество исследований влияния различных факторов на точность вычисления этого параметра [Raymond et al., 1997; Lunt et al., 1999a, b; Makela et al., 2000]. Наиболее распространенной методикой является определение *TEC* вдоль радиолуча по задержке радиосигнала между спутником и наземным приемником, с последующим его пересчетом в вертикальное значение *TEC*.

В настоящей работе представлены модельные расчеты *TEC* вдоль радиолуча между приемником и спутником, с последующим определением вертикального *TEC* и “истинного модельного” *TEC*, рассчитанного с помощью Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) [Намгаладзе и др., 1990]. Определены ошибки квазиэкспериментальной методики определения *TEC* при разных углах обзора приемного устройства в течение суток для станций европейского и американского регионов.

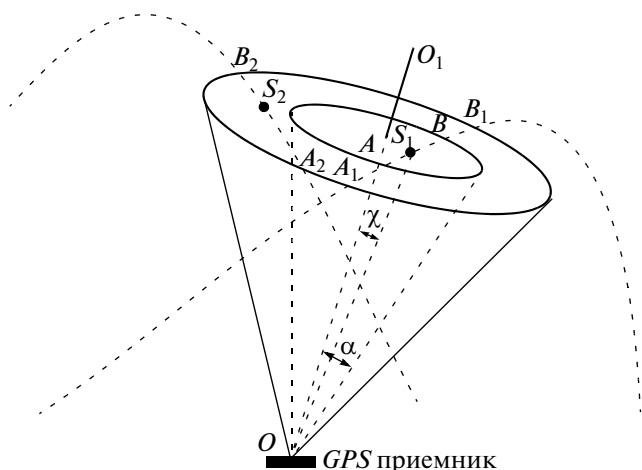


Рис. 1. Схематическое представление геометрии наблюдений и расчетов полного электронного содержания для GPS спутников.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Глобальная система позиционирования [Hoffmann-Wellenhot et al., 1997] представляет собой группировку спутников, находящихся на шести орбитах на высоте около 20200 км над поверхностью Земли. Орбиты имеют наклонение 55° к экватору. На каждой орбите находятся по 4 спутника, отстоящих друг от друга на 90° . Период обращения спутников 12 ч. Таким образом, при наличии всех спутников, в каждый момент времени в каждой точке может наблюдаться от четырех до восьми спутников при угле возвышения приемной антенны $\sim 15^\circ$. Спутники оборудованы стандартами времени и частоты и передают сигналы с цифровой модуляцией на частотах $L1$ (1227.60) и $L2$ (1575.42) МГц. Задержка во времени на каналах передачи $L1$ и $L2$ может быть использована для вычисления TEC вдоль наклонного радиолуча (*Oblique Total Electron Content* — $OTEC$) между спутником и приемником [Baran et al., 1997]. Чтобы сравнить TEC , полученный для разных путей радиолуча, его пересчитывают в эквивалентный вертикальный TEC (*Vertical Total Electron Content* — $VTEC$) по формуле:

$$VTEC = OTEC \cos \chi' + C,$$

$$\chi' = \arcsin(R_E \sin \chi / (R_E + h)),$$

где C — некоторая постоянная, зависящая от свойств аппаратуры, а χ — угол между вертикалью и направлением на спутник, R_E — радиус Земли, h — средняя высота ионосферы, равная 350 км. Ошибка в определении TEC в таком случае составляет порядка нескольких единиц $TECU$ (1 ед. $TECU = 10^{16}$ эл/м²).

Эта ошибка складывается как из определения эффективной высоты ионосферы, которая предполагается очень тонким слоем, так и из влияния горизонтальных градиентов электронной concentra-

ции вдоль радиолуча. Чтобы минимизировать эти ошибки, можно уменьшать угол χ , используемый для наблюдения за спутниками, т.е. учитывать сигналы только от тех спутников, которые пролетают близко от вертикали, проведенной из точки наблюдения.

Схематическое изображение геометрии наблюдения за спутниками показано на рис. 1. Видно, что при небольших углах обзора (α) будет наблюдаться только один спутник $S1$, сигналы от которого будут принимать только во время его перемещения вдоль отрезка AB . С увеличением угла α , в поле зрения приемника попадают другие спутники, например $S2$, (A_2B_2) и увеличивается время наблюдения за спутником $S1$ — отрезок траектории (A_1B_1).

Глобальная Самосогласованная Модель Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП), подробное описание которой дано в работах [Намгаладзе и др., 1990; Namgaladze et al., 1991], позволяет рассчитывать пространственно-временные распределения электронной концентрации, N_e , в околоземном космическом пространстве на высотах от 80 км до 15 земных радиусов. Зная распределение N_e , мы можем вычислить “точное” значение TEC вдоль вертикали (OO_1) от приемника до высоты 20200 км. Одновременно вычисляется $OTEC$ вдоль радиолуча между приемником и видимыми спутниками, например $OS1$. Эти значения $OTEC$ в каждый момент времени пересчитываются в эквивалентный вертикальный $VTEC$ и усредняются по числу наблюдаемых спутников. Полученное значение сравнивается с “точным” вертикальным значением TEC и вычисляется относительная ошибка между этими величинами.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты TEC были выполнены для магнитоспокойных условий весеннего равноденствия 21.03.1993 г., при средней солнечной активности ($F10.7 \sim 130$), для двух европейских станций Тромсе (69.6° N, 19.2° E) и Калининград (55° N, 20° E) и двух станций американского сектора Миллстоун Хилл (42.6° N, 71.5° W) и Аресибо (18.3° N, 66.8° W). Результаты расчетов суточных вариаций “точного” TEC , спутникового TEC , а также относительных ошибок представлены на рис. 2–4. На левых графиках представлены суточные вариации TEC в единицах $TECU$, на правых — модуль относительной ошибки в процентах (тонкие кривые) и число наблюдаемых спутников (жирные кривые) для различных углов конуса обзора приемника (20° — рис. 2; 40° — рис. 3; 60° — рис. 4).

На рисунке 2 представлены результаты расчетов для угла $\alpha = 20^\circ$. Видно, что в суточном ходе спутникового TEC наблюдаются провалы для всех станций, т.е. имеются моменты времени, когда в конус обзора не попадает ни один спутник. Наибольший интер-

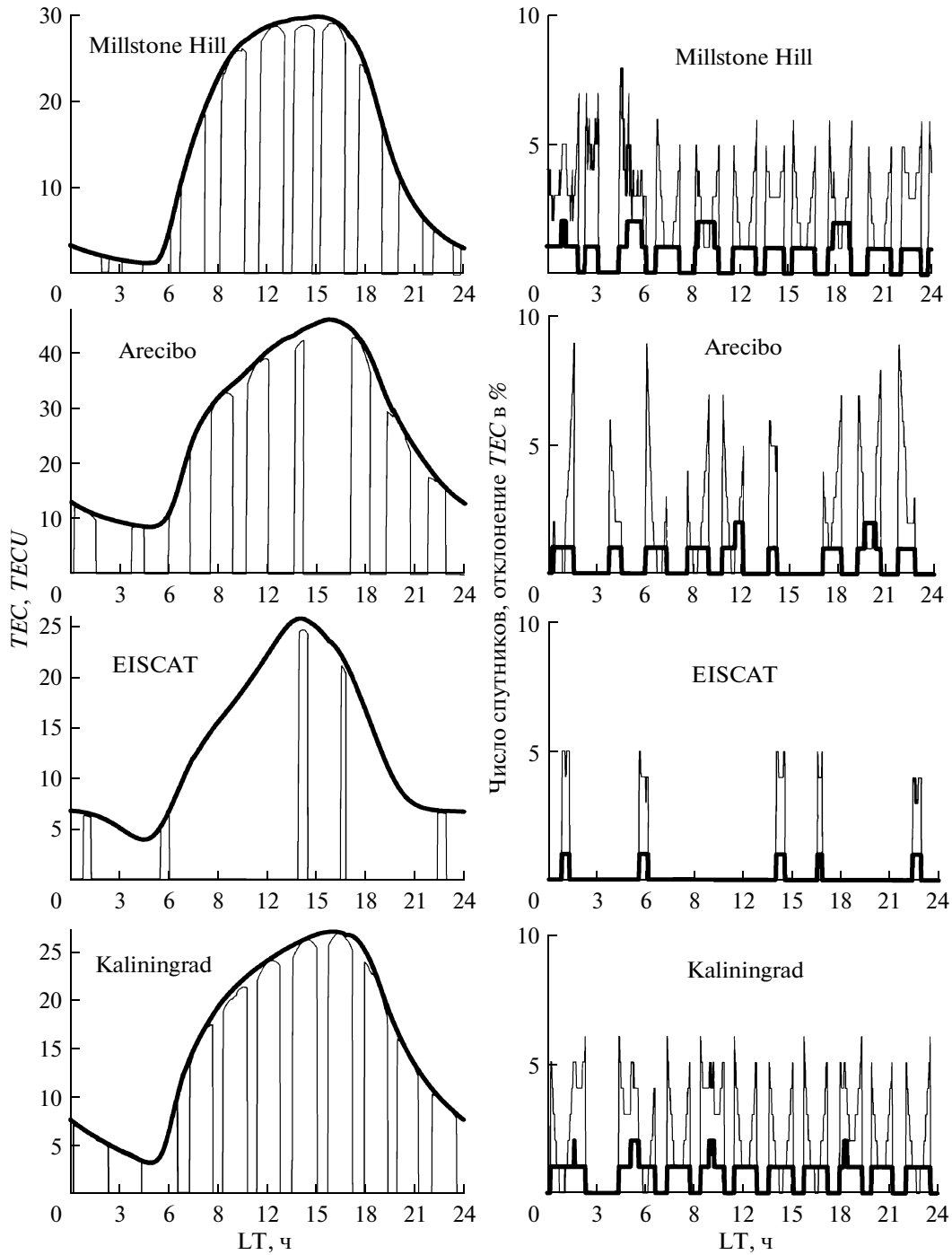


Рис. 2. Суточные вариации для различных станций ”модельных” (жирные линии) и спутниковых (тонкие линии) значений полного электронного содержания (левая панель); суточные вариации числа наблюдаемых спутников (жирные линии) и относительных ошибок расчетов полного электронного содержания (тонкие линии) для угла обзора α , равного 20° (правая панель).

вал отсутствия спутников имеет место с 06:00 LT до 14:00 LT для станции Тромсе. Для станций Миллстоун Хил и Калининград провалы почти регулярны с продолжительностью порядка 2 часов. В некоторые моменты времени над станцией Миллстоун Хилл и Калининград наблюдаются 2 спутника, и

точность определения *TEC* значительно увеличивается, хотя имеются промежутки времени, когда при наблюдении одного спутника ошибка тоже не превышает 4%, но эти промежутки времени достаточно короткие. Над станциями Тромсе и Аресибо всегда наблюдается, по крайней мере, по одному спутнику

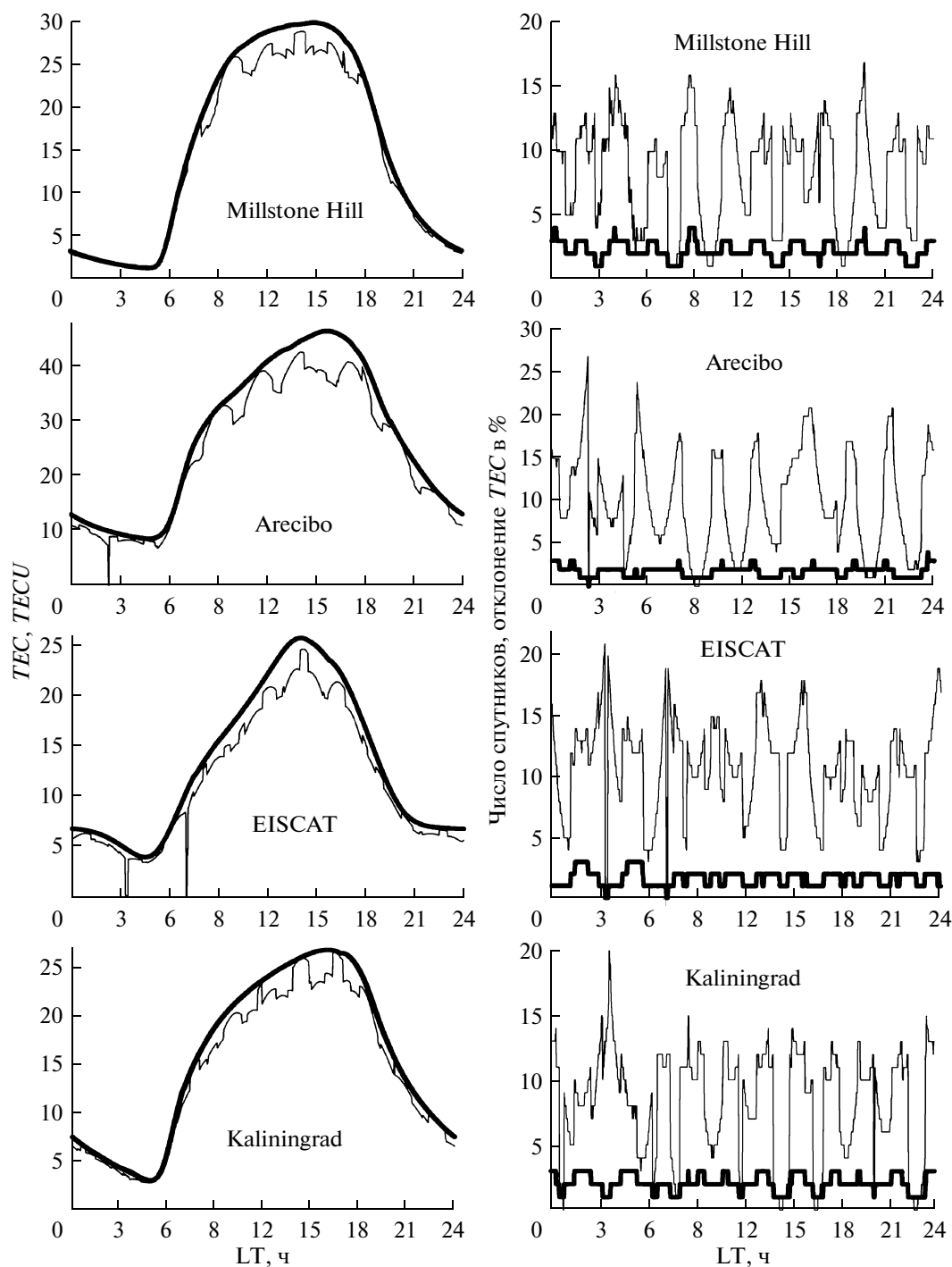


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, для угла обзора α , равного 40° .

за исключением временных интервалов для станции Аресибо с 11:00 до 11:30 и около 20:00 LT, когда наблюдаются два спутника. Максимальная ошибка в рассматриваемом случае не превышает 6% для всех станций за исключением Аресибо, для которой величина относительной ошибки достигает 10% в интервале времени вечер—утро.

С увеличением угла обзора до 40° (рис. 3), провалы в суточной вариации спутникового TEC исчезают. Суточный ход спутникового TEC становится немонотонным. Подъемы и понижения соответствуют наличию или отсутствию спутников на рис. 3. Число наблюдаемых спутников в этом варианте расчетов возрастает и изменяется в течение суток от

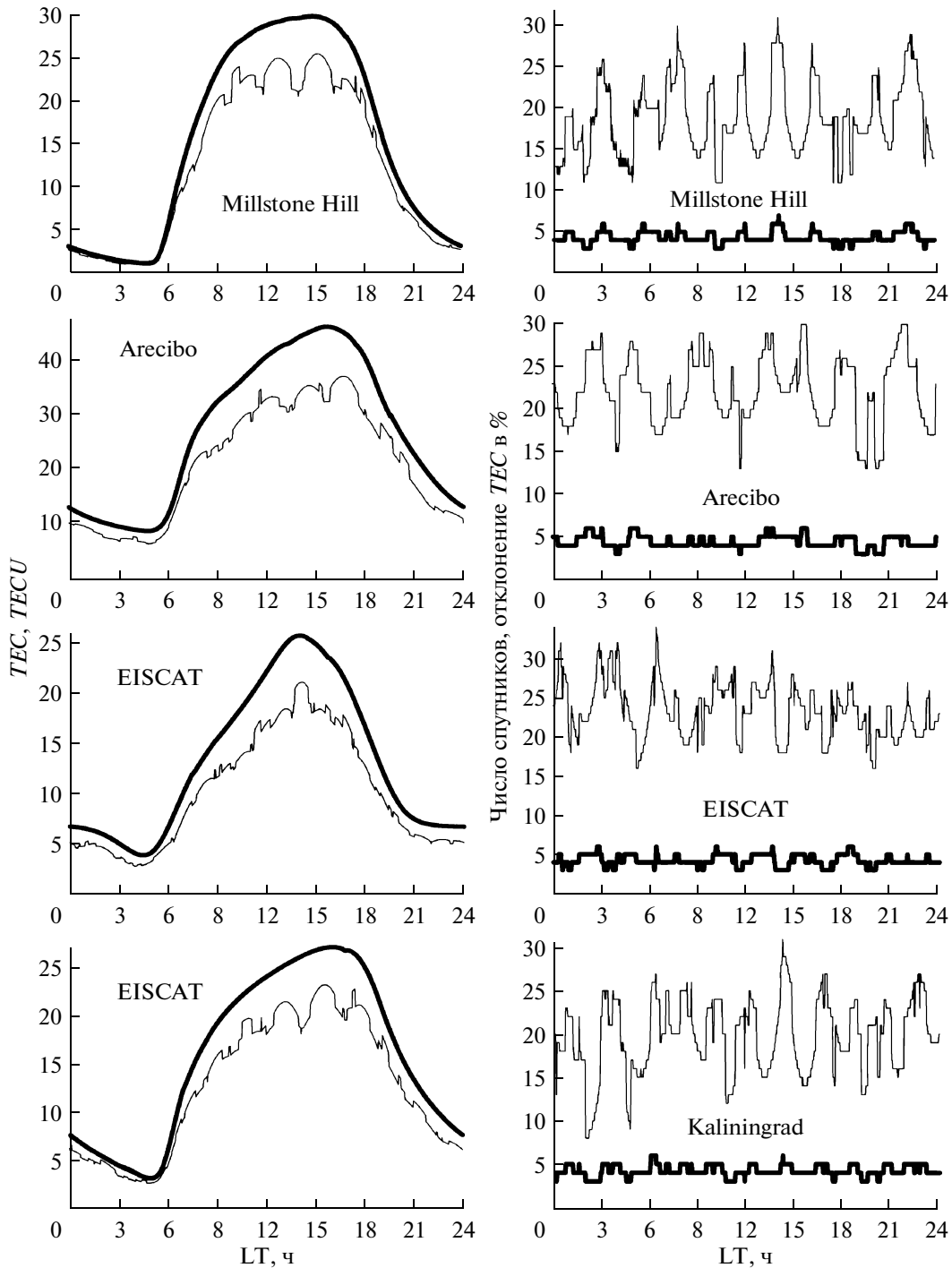


Рис. 4. То же, что и на рис. 2, для угла обзора α , равного 60° .

одного до трех, и также имеет пульсирующую структуру. Однако это не приводит к уменьшению ошибки, а иногда наоборот увеличивает ее. Максимальное значение ошибки наблюдается в ночные часы и составляет $\sim 25\%$ для станции Аресибо, а для остальных станций ее среднее значение в максимумах держится на уровне $\sim 10\%$ в течение суток.

Дальнейшее увеличение угла обзора до 60° (рис. 4) приводит как к увеличению числа наблюдаемых спутников (от 3 до 5), так и к увеличению относительной ошибки в определении спутникового вертикального TEC до нескольких десятков процентов. Величины ошибок примерно одинаковы для всех станций и составляют в пиках $\sim 20\%$. При

этом число видимых спутников достаточно велико, гораздо больше одного. Заметим, что кратковременное увеличение числа спутников до шести, приводит к еще большей ошибке на всех станциях.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего, необходимо отметить, что методика пересчета O_{TEC} в V_{TEC} , использованная в данных расчетах, не является точной копией метода, который применяется при обработке реальных экспериментальных данных. В наших расчетах отсутствует понятие “тонкой” ионосферы и “подионосферной точки”, для которой пересчитывается угол χ . Строго говоря, формула пересчета, широко используемая в стандартных исследованиях, справедлива для однородной, стационарной ионосферы, и, конечно, хорошо работает только при небольших величинах зенитного угла χ . Однако, представленные результаты, наглядно иллюстрируют влияние количества наблюдаемых спутников на суточные вариации относительных ошибок в определении вертикального TEC по спутниковым данным.

Анализ результатов расчетов показывает, что при увеличении угла обзора спутниковый TEC всегда меньше “истинного модельного TEC ”. Это свидетельствует о низкой точности применяемой стандартной методики пересчета наклонного TEC при больших зенитных углах спутника. Увеличение высоты ионосферного слоя приводит к еще большему уменьшению пересчитанного TEC и не может компенсировать ошибку в основной формуле расчета TEC из наклонного в вертикальный.

Другой особенностью расчетов вертикального TEC на основе спутниковых данных является квазипериодическая структура спутниковых TEC . Такой суточный ход возникает из-за восполнения пробелов в TEC , имеющих место при малых углах, данными “новых” спутников, которые становятся видимыми при больших углах конуса наблюдения.

Рассмотрение представленных рисунков позволяет сделать вывод о том, что для получения непрерывной суточной вариации TEC необходимо либо большее число спутников при угле обзора $\sim 20^\circ$, либо увеличение угла обзора до 40° . Первый вариант принципиально возможен, так как на орбитах обычно находятся запасные спутники и, если они “активизированы”, то наблюдения за ними становятся доступными. В текущем десятилетии количество активных спутников GPS предполагается увеличить, и уже в настоящее время группировка GPS спутников насчитывает 32 единицы.

При увеличении угла обзора, как мы уже отмечали выше, происходит некоторая потеря точности (до 10%), но есть моменты (см. рис. 3), когда ошибка составляет $\sim 20\%$. В это же время наблюдается минимальное значение TEC в суточной вариации,

порядка 3 ед. $TECU$, что и приводит к понижению точности определения TEC .

С другой стороны, сравнение кривых “точных” значений TEC и V_{TEC} , определенных по спутникам (рис. 2–4), показывает, что спутниковый TEC оказывается всегда меньше “точного” и имеет квазипериодическую структуру. В экспериментальных данных это может интерпретироваться как некоторое волновое возмущение TEC , хотя “истинная” суточная вариация показывает полное отсутствие такого возмущения. Это связано с тем, что появляющийся дополнительный видимый спутник заполняет своими значениями TEC пробелы в наблюдениях и уменьшает общее среднее значение, увеличивая тем самым относительную ошибку в этот момент времени до 14%. Уменьшить эту ошибку можно селективным отбором спутников, не уменьшая угла конуса обзора.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании представленных результатов можно сделать следующие выводы.

1. При малых углах обзора приемной станции $\sim 20^\circ$, возможны периоды времени, когда отсутствуют наблюдаемые спутники. В эти моменты определение TEC невозможно. Однако, в остальные моменты точность определения TEC по спутниковым данным очень высокая и составляет $\sim 5\%$.

2. С увеличением угла обзора до 40° , провалы в определении TEC по задержкам спутниковых радиосигналов исчезают, но относительная ошибка экспериментального TEC возрастает в среднем до 10%. При этом имеются временные периоды, когда наблюдаются заметные уменьшения TEC по сравнению с “точным” значением, особенно в дневное время. При обработке только экспериментальных результатов эти вариации TEC могут интерпретироваться как временные вариации, которые на самом деле отсутствуют.

3. При больших углах обзора расчеты показывают еще большее возрастание ошибки в определении вертикального спутникового TEC , несмотря на увеличение числа наблюдаемых спутников. Это связано с тем, что траектория радиолуча между спутником и приемником проходит через область значительных горизонтальных градиентов электронной концентрации, а точность пересчета наклонного TEC в вертикальный по основной формуле становится ниже.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альтерт Я.Л. Распространение радиоволн и ионосфера. Москва. АН СССР, 480 с. 1960.
- Альтерт Я.Л. О методе исследования ионосферы с помощью искусственного спутника Земли // УФН. Т. 64. № 1. С. 3–14. 1958.

- Альперт Я.Л., Синельников В.М. О результатах исследований локальной и интегральной концентрации ионосферы с помощью когерентных радиоволн, излучаемых с ИСЗ // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 9. № 3. С. 407–417. 1969.
- Андреанов В.А., Смирнов В.М. Определение высотного профиля электронной концентрации ионосферы Земли по двух частотным измерениям радиосигналов искусственных спутников Земли // Радиотехника и электроника. Т. 38. № 7. С. 1326–1335. 1993.
- Афраймович Э.Л., Лесюта О.С., Ушаков И.И. Геомагнитные возмущения и функционирование навигационной системы GPS // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 42. № 2. С. 220–227. 2002.
- Афраймович Э.Л., Перезалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ ВХ ВСНЦ СО РАН, 480 с. 2006.
- Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В., Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Суроткин В.А., Глуценко Т.А., Наумова Н.М. Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 30. № 4. С. 612–619. 1990.
- Смирнов В.М. Решение обратной задачи радиосвечения ионосферы Земли градиентными методами // Радиотехника и электроника. Т. 46. № 1. С. 47–52. 2001.
- Baran L.W., Shagimuratov I.I., Tepenitsyna N.Yu. The use of GPS for ionospheric studies // Artificial Satellites. V. 32. № 1. P. 49–60. 1997.
- Coco D.S., Ganssiran T.L., Cober C. Passive detection of sporadic E using GPS phase measurements. Radio Sci. V. 30. № 6. P. 1869–1874. 1995.
- Davies K., Hartmann G.K. Studying the ionosphere with the Global Positioning System // Radio Sci. V. 21. № 4. P. 1696–1703. 1997.
- Hajj G.A., Ioanes-Meier R., Kursinski E.R., Romans L.J. Imagine the ionosphere with the Global Positioning System // Int. J. Imag. Sys. Tech. V. 5. P. 174–184. 1994.
- Hajj G.A., Romans L.J. Ionospheric electron density profiles obtained with the Global Positioning System: Results from the GPS/MET experiment // Radio Sci. V. 33. № 1. P. 175–190. 1998.
- Hoffmann-Wellenhot B., Lichtenegger H., Collins J. GPS: Theory and Practice. New-York: Springer-Verlag, 327 p. 1997.
- Jakowski N., Heise S., Wehrenpfenning A., Schluter S., Reimer R. GPS/Glonass based TEC measurements as a contributor for space weather forecast // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 64. № 5/6. P. 729–735. 2002.
- Klobuchar J.A. Real-Time ionospheric science: The new reality // Radio Sci. V. 32. № 5. P. 1943–1952. 1997.
- Lunt N., Kersley L., Bailey G.J. The influence of the protonosphere on GPS observations: Model simulations // Radio Sci. V. 34. № 3. P. 725–732. 1999a.
- Lunt N., Kersley L., Bishop G.J., Mazzella A.J., Baily G.I. The effects at the protonosphere on the estimation of GPS total electron content: Validation using model simulations // Radio Sci. V. 34. № 5. P. 1261–1271. 1999b.
- Makela J.J., Gonzales S.A., MacPherson B., Pi X., Kelley C., Sultan P.J. Intercomparisons of total electron content measurements using the Arecibo in coherent scatter radar and GPS // Geophys. Res. Lett. V. 27. № 18. P. 2841–2844. 2000.
- Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., Ho C.M., Lindqwister U.J., Range T.F. A global mapping technique for GPS-derived ionosphere TEC measurements // Radio Sci. V. 33. № 3. P. 565–582. 1998.
- Namgaladze A.A., Koren'kov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Surotkin V.A., Naumova N.M. Numerical modelling of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // J. Atmos. Terr. Phys. V. 53. № 11/12. P. 1113–1124. 1991.
- Raymond O., Davies K., Musman S. Comparisons of ionospheric total electron contents made at Boulder, Colorado, using GPS // Radio Sci. V. 32. № 3. P. 1081–1089. 1997.
- Titheridge J.E. Determination of ionospheric electron content from Faraday rotation of geostationary satellite signals // Pl. Space Sci. V. 20. № 3. P. 353–369. 1972.
- Wanninger L. Effects of equatorial ionosphere on GPS // GPS World. V. 4. № 1. P. 48–54. 1993.
- Willson B.D., Mannucci A.J. Instrumental biases in ionospheric measurements derived from GPS data // Proc. of ION GPS-93. Alexandria: Inst. of Navigation. P. 1342–1351. 1993.