

Исследование эффективности компенсации влияния среды на работу радиолокационной станции

Оводенко В.Б.*, **Трёкин В.В.****

*Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи, НИИДАР,
ул. 8 Марта, 10, строение 5, Москва, 127083, Россия*

**e-mail: ovodenko@gmail.com*

***e-mail: News197@mail.ru*

Аннотация

В статье исследуется эффективность ряда методов компенсации влияния среды на работу РЛС дециметрового диапазона. Рассматриваются два способа расчёта поправок: долгосрочный прогноз (без адаптации модели к текущим геофизическим условиям) и оперативный прогноз, при котором модель ионосферы адаптируется по данным измерений полного электронного содержания. Для оценки ошибок определения координат использовались высокоточные данные траекторных измерений по космическим аппаратам. Результаты сравнения измерений РЛС и эталонных данных показали, что наибольшая эффективность достигается в режиме оперативного прогноза.

Ключевые слова: радиолокационная станция, ионосфера, модель ионосферы, адаптация модели ионосферы, атмосферная ошибка, полное электронное содержание.

Введение

Атмосфера Земли оказывает значительное влияние на распространение радиоволн. Применительно к надгоризонтным РЛС УКВ диапазона это влияние главным образом сводится к эффектам рефракции и запаздывания радиосигнала, приводящих к ошибкам измерения угла места и дальности соответственно. Существуют работы, посвященные различным способам расчёта поправок к траекторным измерениям РЛС [1-6]. Результаты указанных выше работ основаны, как правило, на среднемесячных параметрах среды распространения. Вопросы адаптации модели к реальным геофизическим условиям и внесения поправок в траекторные измерения РЛС с последующей оценкой их эффективности до сих пор остаются слабо изученными.

Целью данной работы является исследование методов компенсации атмосферных ошибок в траекторных измерениях РЛС и оценка эффективности такой компенсации. При проведении данного исследования были использованы невязки между реальными измерениями РЛС дециметрового диапазона и эталонными измерениями РЛС, полученными на основе высокоточных орбит по ряду космических аппаратов (КА), полученных с помощью сети лазерно–дальномерных средств [7].

В процессе исследования нами были использованы три типа данных. В первом случае рассматриваются невязки, полученные без применения поправок к реальным измерениям РЛС. Во втором и третьем случае к реальным измерениям РЛС применялись поправки, рассчитанные на основе модели атмосферы в режиме долгосрочного и оперативного прогноза соответственно. Под долгосрочным прогнозом понимается среднемесячная зависимость основных параметров атмосферы от времени

суток. Под оперативным прогнозом понимается модель атмосферы, адаптированная по данным текущих измерений параметров.

Расчёт поправок и оценка ошибок измерений РЛС.

Для расчёта поправок по углу места и дальности необходимо знание коэффициента преломления в зоне действия РЛС, а также алгоритм расчёта траектории распространения радиоволн. В диапазоне высот от 0 до 60 км коэффициент преломления определяется на основе региональной эмпирической модели нейтральной атмосферы [8]. Исходными данными для модели нейтральной атмосферы являются: географические координаты и месяц года. В диапазоне высот от 60 до 2000 км коэффициент преломления определяется на основе глобальной эмпирической модели ионосферы IRI-2007 [9]. Исходными данными для модели ионосферы являются: географические координаты, дата и время, а также уровень солнечной активности (СА). В настоящей работе в качестве индекса солнечной активности было выбрано значение числа Вольфа и его прогноз на текущий 24-й цикл согласно методике [10].

Учитывая, что горизонтальная рефракция в рассматриваемом частотном диапазоне РЛС имеет несущественное значение [11], то для расчёта траектории распространения радиоволны выбран метод геометрической оптики для двумерного пространства [12]. Расчёты производятся в местной топоцентрической системе координат, связанной с антенной РЛС. В таком случае измеряемыми параметрами являются: азимут, угол места и наклонная дальность. Исходными данными для алгоритма расчёта поправок являются видимый угол места и азимут. Атмосфера разбивалась на n сферических слоев с коэффициентом преломления, постоянным для каждого элементарного слоя. В каждом слое рассчитывалось искривление лучевой траекто-

рии и задержка. Алгоритм позволяет рассчитывать полную групповую задержку в нейтральной атмосфере и ионосфере, а также истинный угол места.

Далее рассчитывались трехмерные массивы поправок в системе координат: дальность, угол места и азимут, которые впоследствии применялись в блоке траекторной обработки РЛС. Величина поправки для цели с определенными координатами может быть легко получена интерполяцией в трехмерном массиве.

Адаптация модели ионосферы

Известно, что в конкретных условиях текущее состояние ионосферы может существенно отличаться от среднемесячных значений [13]. Данное обстоятельство определяет необходимость учёта текущих измерений параметров ионосферы и проведения коррекции модели ионосферы. Существует различные способы адаптации модели, например, коррекция по данным вертикального, наклонного и возвратно-наклонного зондирования [14,15]. В настоящей работе для адаптации модели ионосферы использовались данные измерений полного электронного содержания (ПЭС или TEC), получаемые с помощью двухчастотного приемника сигналов глобальных навигационных систем. Используя комбинации измерений псевдодальности по коду и фазе на двух частотах ($L1 = 1575$ МГц, $L2 = 1227$ МГц), могут быть получены две независимые оценки TEC:

$$TEC_p = 9.52 \cdot [(P_2 - P_1) + c(DCB_{12}^R + DCB_{12}^S)] \quad (1)$$

$$TEC_\phi = 9.52 \cdot (\Phi_1 - \Phi_2) \quad (2)$$

где:

P_1, P_2 – измерения псевдодальности по коду на частоте $L1$ и $L2$;

Φ_1, Φ_2 – измерения псевдодальности по фазе на частоте L1 и L2;

DCB_{12}^R – дифференциальная задержка в тракте приемника;

DCB_{12}^S – дифференциальная задержка в тракте спутника;

Известно, что TEC_P , рассчитываемый по кодовым измерениям, имеет высокий уровень шума по сравнению с фазовым TEC_Φ [4]. Однако фазовые измерения смещены на неизвестную константу, что препятствует их непосредственному использованию в задаче определения абсолютных значений TEC . На практике нашел применение следующий способ расчёта TEC :

$$TEC = TEC_\Phi + \langle TEC_P - TEC_\Phi \rangle_{ARC} \quad (3)$$

где треугольные скобки означают выбор последовательности измерений без срыва фазы.

Корректировка модели ионосферы состоит в поиске управляющего параметра модели W , при котором достигается минимальное расхождение между измеренными и модельными значениями наклонного TEC . Модельное значение TEC_{MOD} определяется методом численного интегрирования для заданного направления на спутник:

$$TEC = \int_{h_{Bot}}^{h_{Sat}} Ne(h)dh \quad (4)$$

где:

$Ne(h)$ – электронная концентрация на высоте h ;

h_{Bot} – нижняя граница интегрирования;

h_{Sat} – верхняя граница интегрирования (высота спутника).

В качестве целевой функции TF была выбрана сумма квадратов невязок между измерениями TEC_{OBS} и модельными значениями TEC_{MOD} по всем наблюдаемым N спутникам:

$$TF = \sum_{i=1}^N \Delta TEC_i^2 \quad (5)$$

где ΔTEC представляет собой разность между измеренным и модельным значением наклонного ТЕС:

$$\Delta TEC = TEC_{OBS} - TEC_{MOD} \quad (6)$$

Значение W , при котором достигается минимум целевой функции, будем называть эффективным значением числа солнечных пятен W_{eff} .

Ниже приведены экспериментальные данные, иллюстрирующие процесс адаптации модели ионосферы. На рисунке 1 представлены невязки между измеренными и модельными значениями наклонного TEC для 27 марта 2014 г. Измерения проводились в районе г. Калининград. Для коррекции модели ионосферы отбирались измерения TEC по спутникам с углом места более 60° .

Как показал анализ данных рисунка 1, наибольшее отклонение между измерениями и моделью наблюдалось в послеполуденное время и составило порядка 25-35 TECU. Наименьшее отклонение наблюдалось в ночное время и составило около 10 TECU. Корректировка модели при этом обеспечивала среднюю остаточную невязку 1.4 TECU, а максимальная остаточная невязка составила не более 5.5 TECU. Эффективные значения числа солнечных пятен W_{eff} в рассматриваемом периоде достигали значений 150 – 170 единиц, в то время как прогнозируемое значение W составляло 65 единиц.

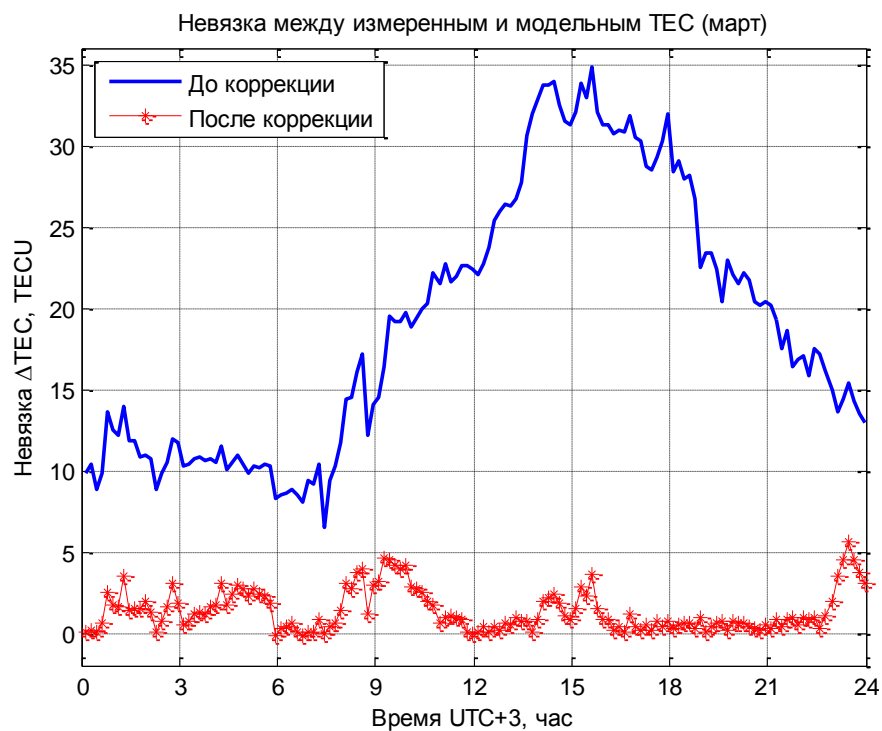


Рис. 1

Зависимость невязки между измеренным и модельным значением TEC на суточном интервале для 27.03.2014.

Оценка ошибок измерения координат

Ошибка определения координат в нашем случае определялась, как разность между измеренным и эталонным значением. В качестве реальных измерений в данной работе использовались единичные измерения РЛС, полученные в результате сопровождения юстировочных КА. Под эталонными измерениями будем понимать высокоточное положение КА, преобразованное к форме единичных измерений с помощью модели измерения РЛС. В качестве источника данных по высокоточному положению КА была использована база данных международной лазерно-дальномерной сети. Средства сети ведут постоянное наблюдение за КА, оборудо-

ванными ретрорефлекторами. В литературе принято такие КА называть юстировочными [16]. Однако, как показывает практика, далеко не все КА могут быть использованы, т.к. для радиолокационного наблюдения высокоорбитальных навигационных спутников необходим высокий энергетический потенциал РЛС. Параметры юстировочных КА, по которым имеются измерения РЛС, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры юстировочных КА

№	Название	Высота орбиты апогей/перигей (км)	Накл. (град)
1	Beacon-C	1299/951	41
2	Starlette	1107/805	50
3	Ajisai	1513/1478	50
4	Stella	805/797	99
5	Larets	692/676	98.2
6	Jason-2	1347/1340	66
7	Cryosat-2	732/713	92
8	Haiyang 2A	967/966	99.4

Результаты и обсуждение

Для представления результатов выбрана эмпирическая функция распределения невязок единичных измерений, нормированных к требуемой максимальной невязке единичных замеров – некоторой заданной величине. В нашем случае величина нормированной невязки $n_{\text{норм}}$ рассчитывалась как:

$$n_{\text{норм}} = \frac{n_{\text{текущ}}}{n_{\text{треб}}}, \quad (7)$$

где:

$n_{\text{текущ}}$ – текущее значение невязки;

$n_{\text{треб}}$ – требуемая, в соответствии с нормативно-техническим документом, ошибка измерения параметра.

Использование нормированных невязок при проведении оценок относительной эффективности корректировки измерений РЛС обусловлено тем, что трудно установить единую меру в абсолютных значениях, которая бы могла служить наглядным показателем эффективности рассматриваемых методов коррекции для любого времени суток даже для одной рассматриваемой РЛС. Кроме того, применение абсолютного значения ошибки существенно затрудняет проведение сравнительной оценки эффективности того или иного метода коррекции для различных РЛС, так как в этом случае абсолютные показатели для рассматриваемых РЛС оказываются неравноправными.

На рисунках 2,3 представлены графики, иллюстрирующие интегральные функции распределения невязок по дальности и углу места соответственно. Для расчётов использовались данные измерений РЛС дециметрового диапазона по спутникам юстировочного класса. Всего было получено около 2000 единичных измерений в течение 27-29 марта 2014 года. Геомагнитная обстановка в указанный период была спокойной, минимальное значение индекса Dst составило -22 нТ.

В первом случае строились интегральные функции распределения невязок без компенсации атмосферных ошибок, на рисунках 2 и 3 они обозначены «Без поправ-

ки». Фактически этот случай соответствует реальному распределению текущих ошибок измерения рассматриваемых параметров.

Во втором случае вводились поправки, рассчитанные по модели ионосферы с учетом прогнозного значения W , но без коррекции модели по данным текущих измерений наклонного TEC – обозначение «С учётом поправки (прогн.)».

В третьем случае вводились поправки, рассчитанные по модели ионосферы с учётом её коррекции по данным текущих измерений наклонного TEC – обозначение «С учётом поправки (тек.)».

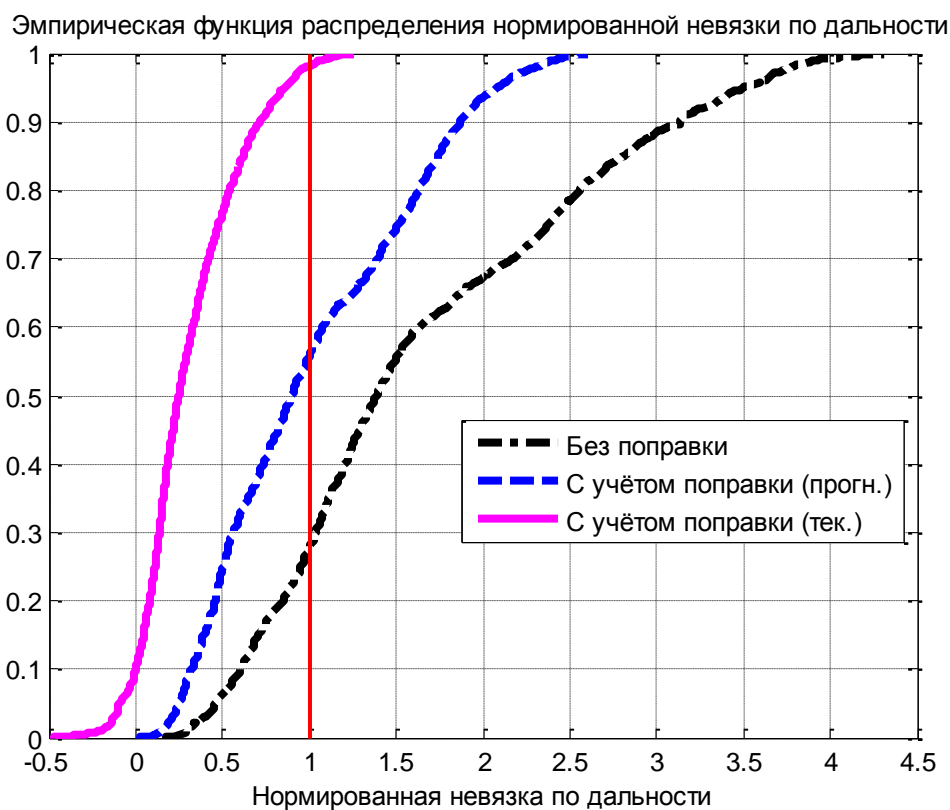


Рис. 2 Эмпирическая функция распределения нормированной невязки по дальности

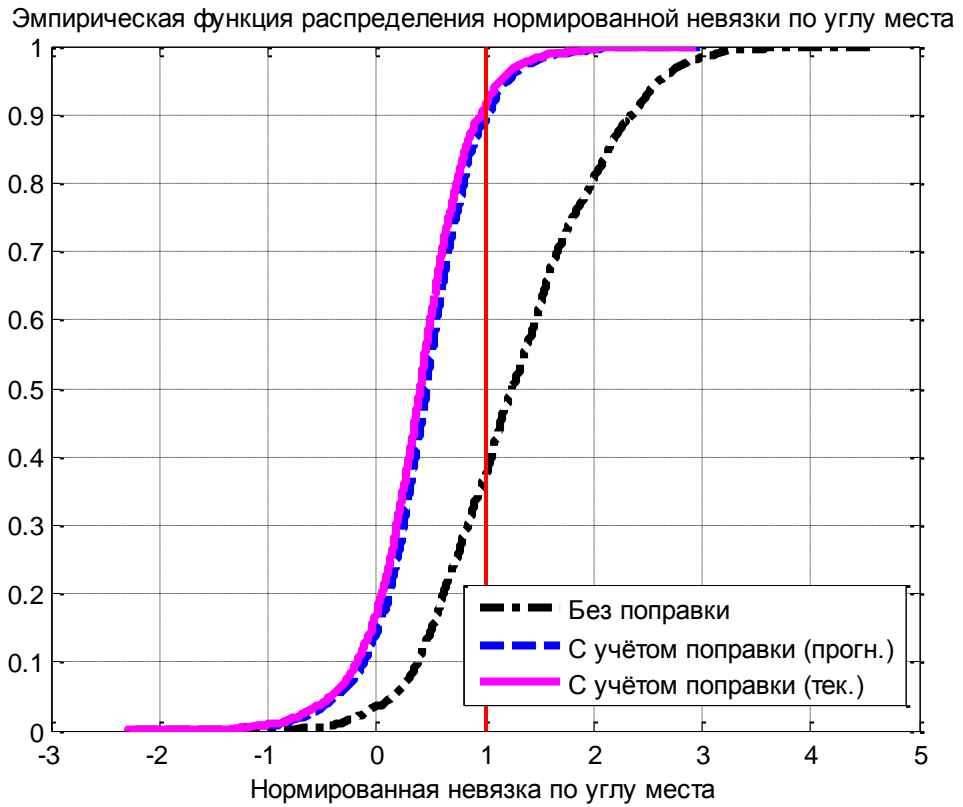


Рис. 3 Эмпирическая функция распределения нормированной невязки по углу места

Статистические параметры невязок – среднее значение и СКО представлены в таблицах 2 – 3.

Таблица 2 Невязки по дальности

Режим	Средняя невязка	СКО невязки
без компенсации	1.66	0.94
долгосрочный прогноз	0.87	0.53
оперативный прогноз	0.30	0.28

Таблица 3 Невязки по углу места

Режим	Средняя невязка	СКО невязки
без компенсации	1.56	0.92
долгосрочный прогноз	0.54	0.58
оперативный прогноз	0.47	0.58

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Введение поправок в режиме долгосрочного прогноза позволяет повысить точность единичных измерений. По дальности улучшение составило 47,6%, по углу места точность единичных измерений повысилась на 65,4%. Аналогичное уменьшение получено и для СКО невязки. По дальности СКО улучшилось на 43,6%, а по углу места - на 37%.

2. Использование поправок, рассчитанных в режиме оперативного прогноза, позволяет существенно повысить точность единичных измерений РЛС по дальности

по сравнению с долгосрочным прогнозом. Итоговое улучшение средней невязки по дальности составило 82%, а СКО – 70%

Указанное обстоятельство позволяет, в зависимости от требуемого качества решения задачи траекторных измерений и возможного доступа к текущей геофизической информации (в нашем случае оперативное получение данных ТЕС), реализовывать дифференцированный подход к необходимости использования скорректированных моделей атмосферы при измерениях того или иного параметра (дальность, угол места). Кроме того, исходя из заданных требований по точности измерений, могут быть сформированы требования: к точности используемой модели, оперативности проведения её коррекции и необходимому составу привлекаемой дополнительной аппаратуры для измерения параметров среды.

Заключение

В статье исследована эффективность компенсации влияния среды распространения в надгоризонтной РЛС. Поправки к траекторным измерениям рассчитывались в режиме долгосрочного прогноза при использовании среднемесячных параметров атмосферы и в режиме оперативного прогноза, при котором проводилась адаптация модели ионосферы по данным текущих измерений наклонного ТЕС.

Результаты исследования эффективности применения поправок, полученных разными методами, показали, что в режиме долгосрочного прогноза применение поправок уменьшает ошибки измерения дальности и угла места. По дальности улучшение средней невязки составляет 47,6%, по углу места – 65,4%. СКО невязок также уменьшилось: по дальности улучшение составило 43,6%, а по углу места 37%.

Учет текущих измерений параметров ионосферы в режиме оперативного прогноза позволяет значительно уменьшить ошибки измерения дальности по сравнению с долгосрочным прогнозом. Улучшение средней невязки составило 82%, а СКО – 70%. Невязка измерения угла места не изменилась.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта

РФФИ №16-35-00590 мол_а, гранта Президента РФ НШ-6831.2016.8

Библиографический список

1. Карачевцев А.М. Основные астрометеофизические факторы, определяющие точность координатно-временных измерений средств системы контроля космического пространства. Пути достижения требуемой точности // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 2. С. 34-38.

2. Курикша А.А., Липкин А.Л. Исследование эффективности использования модели IRI-2012 для внесения поправок в радиолокационные измерения координат спутников // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. Т. 18. №5. С. 21-26.

3. Соколов К.С., Трекин В.В., Оводенко В.Б., Патронова Е.С. Метод оперативного учета влияния среды на траекторные измерения // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. №2. С. 17-21.

4. Stephen, M.H.; Sigrid, C. Anthony, V. Equatorial Atmospheric and Ionospheric modeling at Kwajalein Missile Range. Lincoln Laboratory Manual, 2000, 12(1), 45-64.

5. Allen, R., D. Donatelli and M. Picardi, "Correction for Ionospheric Refraction for Cobra Dane", AFGL-TR-77-0257, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB MA, 18 Nov 77. Available at: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a053222.pdf>

6. Dulong D.D. Reduction of the uncertainty of radar range correction. NASA STI/Recon Technical Report N 06/1977. Available at: <http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA046166>

7. Pearlman, M.R., Degnan, J.J., and Bosworth, J.M., "The International Laser Ranging Service", Advances in Space Research, Vol. 30, No. 2, pp. 135-143, July 2002, DOI:10.1016/S0273-1177(02)00277-6.

8. Соколов К.С., Оводенко В.Б. Региональная эмпирическая модель нижней атмосферы с возможностью оперативной коррекции в рамках алгоритма учета атмосферной коррекции траекторных измерений // Сборник научных трудов конференции RLNC-2011. Т. 2. С. 1253 – 1260.

9. D. Bilitza and Reinisch, B., International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters, J. Adv. Space Res., 42, #4, 599-609, doi:10.1016/j.asr.2007.07.048, 2008

10. Расчеты баллистические искусственных спутников Земли. Методика расчета индексов солнечной активности. ГОСТ 25645.302-83. – М.: Издательство стандартов, 1983. – 21 с.

11. Колосов М.А. и др., Распространение радиоволн при космической связи. – М.: Связь, 1969. – 155 с.

12. Современная радиолокация (анализ, расчет и проектирование систем) / Под ред. Ю. Б. Кобзарева. – М.: Советское радио, 1969. – 704 с.

13. Mikhailov, A. V., B. A. de la Morena, G. Miro, and D. Marin (1999), A method for foF2 monitoring over Spain using the EI Arenosillo Digisonde current observations, *Ann. Geophys.*, 42(4), 683–689.

14. Шлюпкин А.С. Исследование эффективности применения международной модели ионосферы IRI-2001 для прогнозирования характеристик ВЧ радиосвязи: дис. ... канд. тех. наук. – Ростов на Дону, 2006. - 145 с.

15. Тетерин К.А. Локальная адаптация модели ионосферы IRI по данным возвратно-наклонного зондирования // *Геомагнетизм и Аэрономия*. 2013. Т. 53. №3. С. 354-360.

16. Гозюмов Г.И. Обзор состояния и развития спутников юстировочно-калибровочного класса – М.: Вымпел, 1996. 15 с.