

УДК 621.3.09

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ
МЕТЕОПАРАМЕТРОВ НА ОШИБКИ
ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ В РЛС**

В. Б. Оводенко, Е. С. Патронова, К. С. Соколов, В. В. Трекин

ОАО «НПК «НИИДАР»

Получена 1 июня 2013 г.

Аннотация. Рассмотрены вопросы оперативного учёта влияния среды распространения в работе РЛС ДО. Проанализировано влияние вариаций метеорологических параметров на величину рефракционных ошибок на основе экспериментальных данных. Предложен алгоритм определения периодов резкого увеличения рефракционных ошибок.

Ключевые слова: рефракция, атмосфера, тропосфера, РЛС.

Abstract: Questions of operational accounting medium effect on the long range detection radar operation are reviewed. The effects of varying meteorological parameters on refractive errors are analyzed based on experimental data set. The algorithm for detecting periods of sharp refractive errors increase is proposed.

Key words: refraction, atmosphere, troposphere, radar.

Введение

Одним из внешних факторов, определяющих качество функционирования радиолокационной станции дальнего обнаружения (РЛС ДО), является влияние среды распространения радиоволн [1,2]. Повышение требований к точностным характеристикам РЛС такого типа потребовало постановки и решения задачи оперативного учета и прогноза ряда факторов среды распространения, влияющих на траекторные параметры сопровождаемых целей: угловые координаты и дальность.

В настоящее время существуют два типа систем прогноза характеристик среды: долговременные и кратковременные. Первые являются по своему существу статистическими и предназначены для оценки средних значений характе-

ристик среды распространения и их разброса. Системы кратковременного прогнозирования предназначены для оперативной оценки геофизических параметров среды в заданной области, где происходит распространение радиосигнала. Такие системы, как правило, являются локально детерминированными. Они привязаны к некоторым характеристикам РЛС (место расположения, зона действия, режим работы, параметры зондирующего радиосигнала, ожидаемый поток сопровождаемых объектов). Системы кратковременного прогнозирования используются в основном для уточнения ожидаемых условий функционирования РЛС с последующей (при наличии соответствующих алгоритмов) адаптацией программно-алгоритмического обеспечения РЛС и режимов её работы к текущим условиям функционирования.

Системы прогнозирования характеристик среды для РЛС должны удовлетворять ряду специальных требований, которые должны быть учтены в процессе её проектирования, разработки и эксплуатации. Приведем некоторые из них [3,4]:

- большой объем контролируемого пространства обуславливает высокие требования к объему информации, необходимой для моделирования состояния среды и подготовки текущих данных;

- большое число обслуживаемых целей, с одной стороны, и требование минимизации временного интервала на обслуживание каждой конкретной цели, с другой стороны, повышают требования к оперативности учёта состояния среды в каждом конкретном направлении (для каждой цели);

- учитывая важность принятия решения по результатам траекторных измерений по целям, выдача корректирующих поправок должна происходить без задержек, в режиме реального времени.

Анализ работ, посвященных учёту влияния среды, показывает, что методы описания текущих условий работы, базирующиеся на статистических характеристиках среды распространения, могут быть использованы для получения

оценок работы РЛС в целом, но не позволяют осуществлять оперативную адаптацию к текущим условиям функционирования [5-9].

Анализ литературных источников по вопросу оперативной корректировки влияния среды на траекторные измерения РЛС показал, что наиболее проработанным является прогноз регулярных составляющих изменения параметров приземной атмосферы (сезонно-суточные изменения) [5-13]. Однако существующие в настоящее время высокие требования к точности траекторных измерений непосредственно на интервале сопровождения цели (т.е. практически в реальном масштабе времени) определяют необходимость оперативного учета и корректировки влияния среды распространения. Это обстоятельство определяет актуальность исследования кратковременных вариаций параметров среды, и их влияния на качество работы РЛС ДО. Предметом исследования данной работы является влияние нейтральной атмосферы на работу РЛС ДО, влияние ионосферы не рассматривается.

1. Основная часть

Как известно, основными параметрами, характеризующими состояние нейтральной атмосферы, являются: температура воздуха, атмосферное давление и относительная влажность [13]. Эти параметры определяют величину индекса рефракции, на основе пространственного распределения которого рассчитывается траектория распространения радиоволны [1].

Изменения температуры воздуха бывают периодические (суточные, сезонные, годовые) и непериодические. При суточных изменениях температура воздуха меняется вслед за температурой земной поверхности, от которой происходит нагрев воздуха [14]. Ход температуры при этом ярко выражен и имеет периодический характер в ясную погоду. Отклонения от нормального суточного хода температуры в атмосферном пограничном слое указывают на влияние локальных факторов и изменения под воздействием крупномасштабных атмосферных процессов, включая атмосферные фронты.

Периодические вариации температуры воздуха в умеренном климате вполне регулярны, когда отсутствуют явления, вызванные фронтами, грозами и т.п. В полярных областях суточные вариации определяются, в основном, облачностью и скоростью ветра у поверхности Земли. Наиболее резкие аномалии в суточном ходе температуры связаны с прохождением атмосферного фронта и выпадением осадков [14]. Прохождение зоны фронта сопровождается резким падением температуры во всем приземном слое. Летние кратковременные дожди сопровождаются резким изменением температуры воздуха и влажности – температура уменьшается, а влажность увеличивается. По окончании конвективных осадков, как правило, восстанавливаются характерные для времени суток метеоусловия.

Для анализа влияния вариаций метеопараметров на величину рефракционной ошибки был проведен ряд расчетов для четырех отличающихся по условиям функционирования случаев (временных интервалов) на основе двух наборов суточных метеонаблюдений в приземном слое с темпом измерения 10 секунд. Экспериментальные данные получены с помощью автоматической метеостанции МК-15, расположенной в НИИДАР (г. Москва). Время эксперимента соответствовало летнему сезону.

В первом наборе, отражающем типовой суточный ход метеопараметров рассматриваются 3 случая. Во втором наборе, отражающем аномальный ход метеопараметров (резкий ливень), рассматривается четвертый случай. В первом случае рассматривается восходный период, когда температура активно увеличивается под действием солнечной радиации, а влажность уменьшается. Во втором случае представлены данные, соответствующие заходному периоду, когда температура воздуха плавно уменьшается, а влажность увеличивается. В третьем случае рассмотрено влияние локальных кратковременных флуктуаций, а в четвертом – влияние интенсивного ливня (резкое увеличение влажности и уменьшение температуры).

Для конкретных значений измеренных метеопараметров рассчитывалось приземное значение индекса рефракции N_s . Профиль индекса рефракции рассчитывался на основе эмпирической формулы [2]:

$$N(h) = N_s \exp\{-c_e(h - h_s)\}$$

где:

h_s - высота над уровнем моря,

h - высота над земной поверхностью;

$c_e = \ln \frac{N_s}{N_s + \Delta N}$ - постоянная величина.

Расчеты поправок по углу места и дальности проводились на основе сферически-слоистой модели атмосферы и геометрооптического приближения для построения траектории радиолуча [1,2]. Поправки рассчитывались для минимального угла места наблюдения 0° на дальностях порядка 900 км. Использование данного углового направления позволяет оценить максимально возможное влияние нейтральной атмосферы. Кроме того, данное направление обеспечивает максимальную дальность обнаружения целей реального космического фона и, следовательно, наибольший интервал для определения её траекторных параметров.

2. Результаты расчетов

Вначале рассмотрим случай, где наблюдался типовой суточный ход температуры и влажности воздуха (рисунок 1), а также соответствующие рефракционные поправки (рисунок 2). На приведенных суточных зависимостях температуры и влажности можно выделить несколько характерных периодов. На рисунках они обозначены цифрами 1 -4.

Периоду под номером 1 соответствует восход, в течение которого происходило наиболее быстрое изменение метеопараметров. Для рассматриваемого случая он соответствует времени от 8.30 до 9.10 часов. Период под номером 2 соответствует заходу. Для рассматриваемого случая исследуется интервал между 22.10 и 23.00 часами, где наблюдается плавное изменение метеопараметров.

В третьем случае рассматриваются локальные дневные кратковременные флуктуации метеопараметров (интервал времени от 14-10 до 14.50).

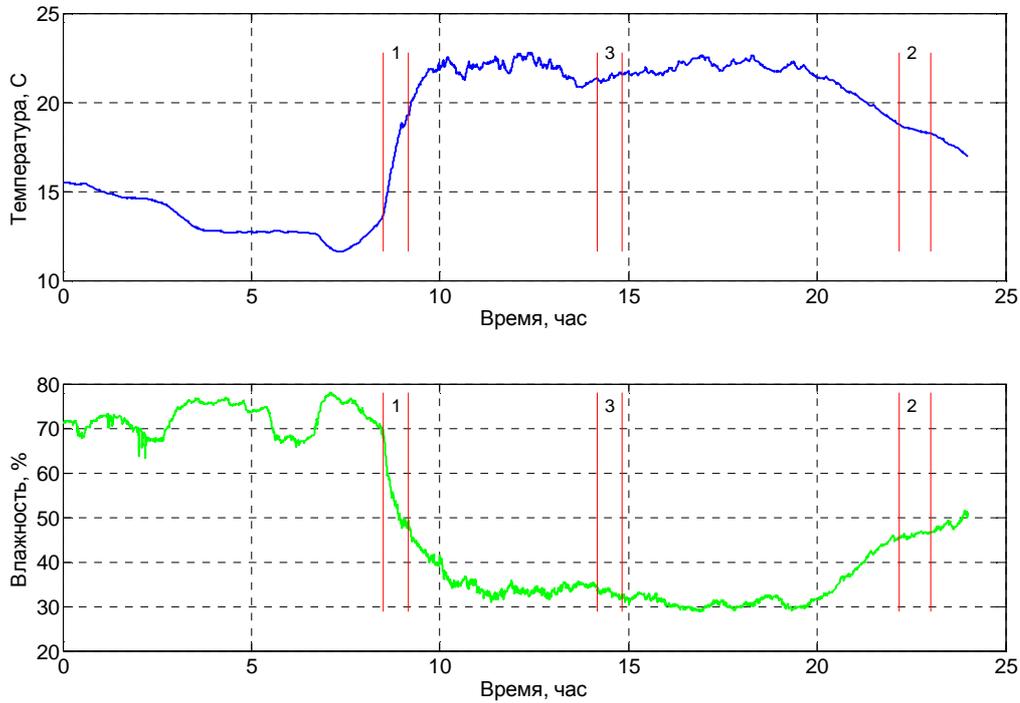


Рис. 1 – типовой суточный ход температуры и влажности воздуха

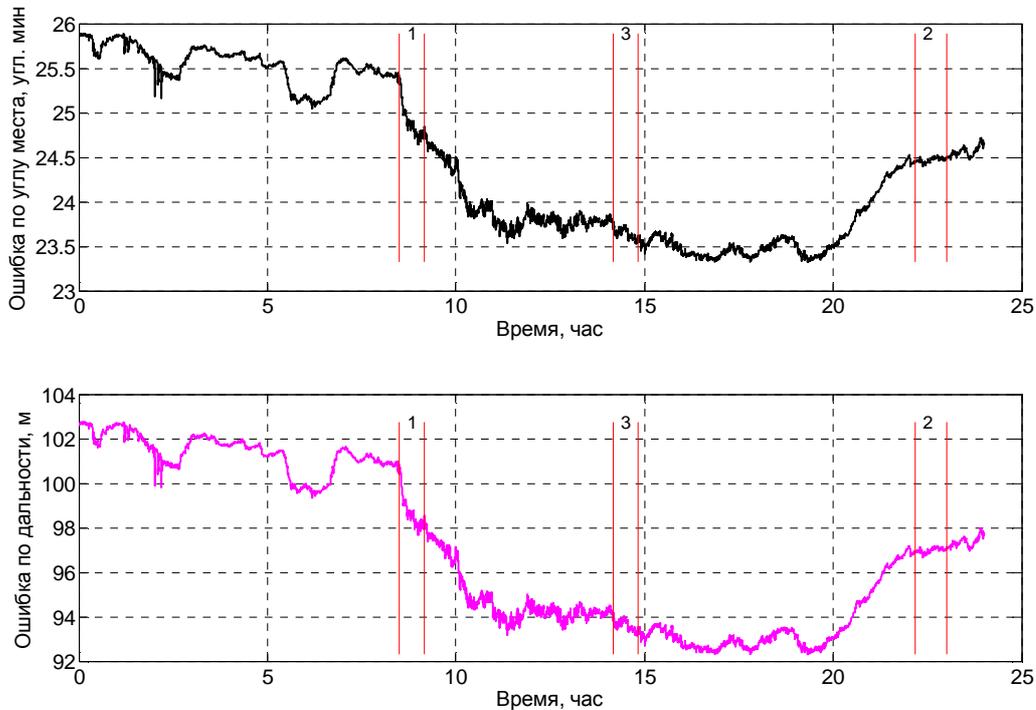


Рис. 2 – Рефракционные поправки по углу места и дальности для типowego суточного хода метеопараметров

В таблицах 1-4 представлены рассчитанные поправки по углу места и дальности и соответствующие им метеопараметры для каждого из периодов с темпом выборки 10 минут. Под рассчитанной поправкой понимается разность между видимым и истинным положением цели. В столбце «Отклонение» представлена разность между текущим и предыдущим значением поправки, характеризующее скорость её возрастания (убывания).

Таблица 1. Рефракционные поправки для восходного периода

Время	температура, С	влажность, %	давление, гПа	Угол места		Дальность	
				Поправка, угл. мин.	Отклон.	Поправка, м	Отклон.
08-30	13.66	68.3	999.51	25,35	-	100,55	-
08-40	15.68	58.5	999.5	25,02	-0,33	99,22	-1,33
08-50	17.45	52.9	999.54	24,87	-0,15	98,63	-0,59
09-00	18.68	47.8	999.58	24,65	-0,22	97,70	-0,93
09-10	19.27	48.5	999.6	24,79	0,14	98,29	0,59

Из данных таблицы 1 видно, что на 10-минутном интервале максимальное изменение поправки по углу места составляет не более 0,33 угловых минуты, а по дальности – не более 1,33 метра.

Таблица 2. Рефракционные поправки для заходного периода

Время	температура, С	влажность, %	давление, гПа	Угол места		Дальность	
				Поправка, угл. мин.	Отклон.	Поправка, м	Отклон.
22-10	18.78	45.3	999.03	24,44	-	96,87	-
22-20	18.6	45.6	999.06	24,45	0,01	96,88	0,01
22-30	18.55	45.7	999.11	24,45	0,00	96,89	0,01
22-40	18.42	46.3	999.14	24,48	0,03	97,02	0,13
22-50	18.32	46.4	999.16	24,47	-0,01	97	-0,02
23-00	18.24	46.5	999.26	24,48	0,01	97,01	0,01

Из данных таблицы 2 видно, что на 10-минутном интервале максимальное изменение поправки по углу места составляет не более 0,03 угловых минуты, а по дальности – не более 0,13 метра.

Таблица 3. Рефракционные поправки для локальных флуктуаций

Время	температура, С	влажность, %	давление, гПа	Угол места		Дальность	
				Поправка, угл. мин.	Отклон.	Поправка, м	Отклон.
14-10	21.36	34.4	998.16	23,75	-	94,07	-
14-20	21.29	33.8	998.85	23,70	-0,05	93,88	-0,19
14-30	21.39	34	998.76	23,73	0,03	93,99	0,11
14-40	21.52	32.3	998.73	23,58	-0,15	93,38	-0,61
14-50	21.57	32.6	998.69	23,61	0,03	93,51	0,13

Из данных таблицы 3 видно, что на 10-минутном интервале максимальное изменение поправки по углу места составляет 0.15 угловых минут, а по дальности – не более 0.61 м.

Далее рассмотрим четвертый случай, когда наблюдался аномальный суточный ход температуры и влажности.

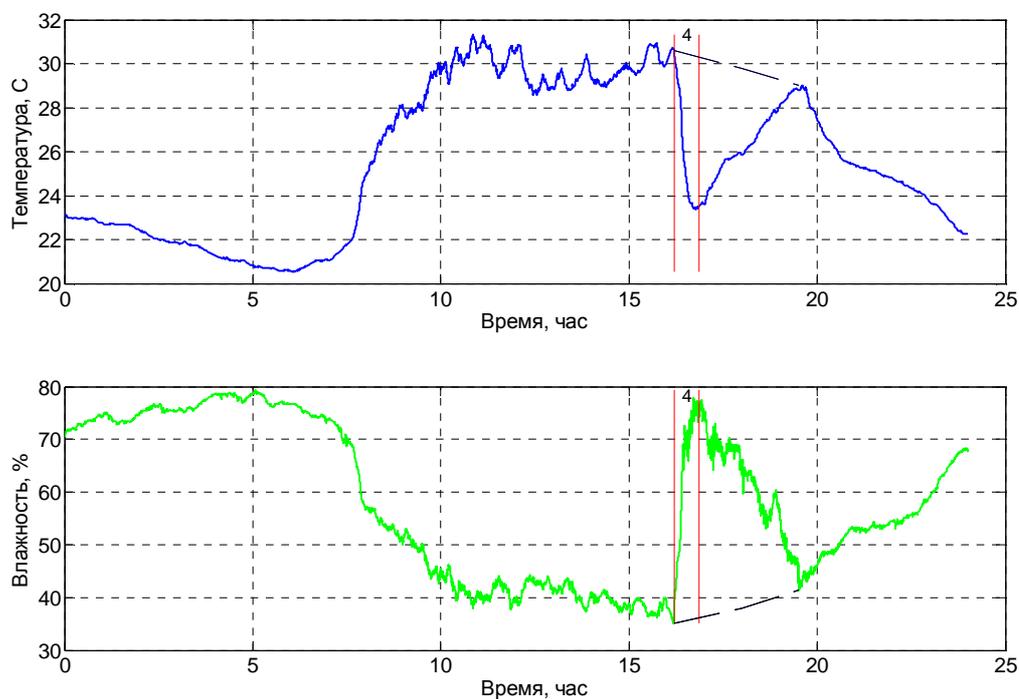


Рис. 3 – аномальный суточный ход температуры и влажности воздуха

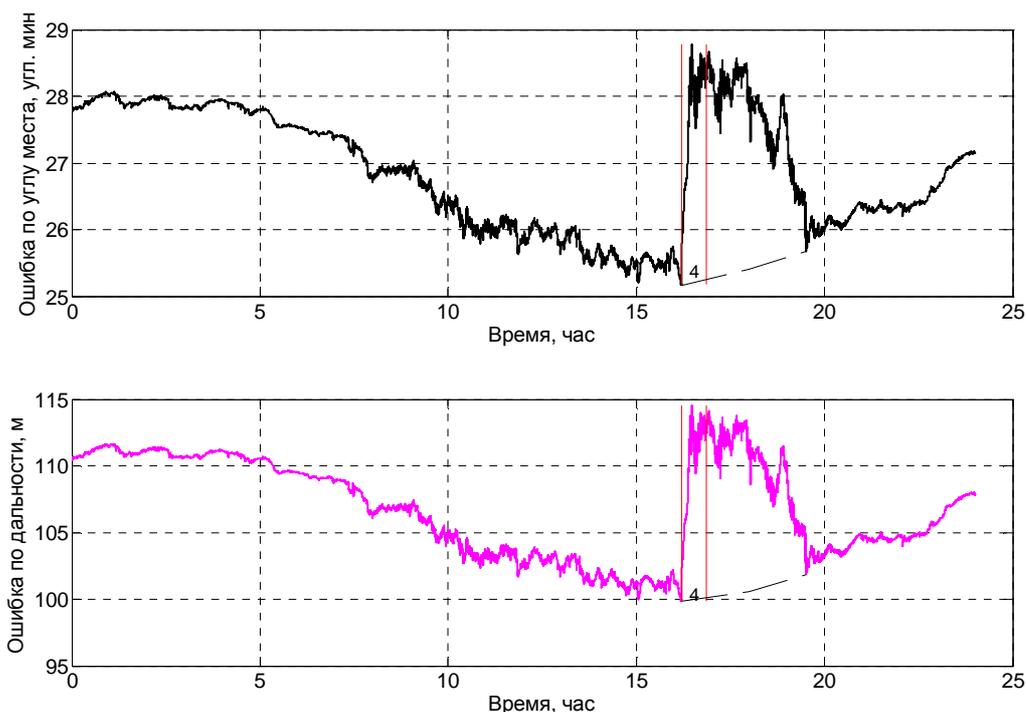


Рис. 4 – Рефракционные поправки по углу места и дальности для аномального суточного хода метеопараметров

Рассмотрим период, в течение которого происходит наиболее быстрое изменение метеопараметров, обусловленное кратковременным ливневым дождем – между 16.10 и 16.40 часов по местному времени (участок под номером 4 на рис. 3).

Таблица 4. Рефракционные поправки во время ливня

Вре- мя	темпера- тура, С	влаж- ность, %	давление, гПа	Угол места		Дальность	
				угол места, угл. мин.	От- клон.	По- правка, м	Отклон.
16-12	30.36	39.6	994.88	25,76	-	102,24	-
16-22	28.34	53.9	995.27	27,34	1,58	108,7	6,46
16-32	24.5	70.7	995.34	28,20	0,86	112,22	3,52
16-42	23.48	77.7	995.37	28,61	0,41	113,9	1,68
16-52	23.48	75.1	995.29	28,41	-0,20	113,08	-0,82

Из данных таблицы 1 видно, что на 10-минутном интервале максимальное изменение поправки по углу места составляет не более 1,58 угловых минуты, а по дальности – не более 6,46 метра.

3. Анализ полученных результатов

В суточном ходе метеопараметров (и рефракционных поправок) можно выделить регулярные периоды времени, характеризующиеся установившимися (день, ночь) и переходными (восход, заход) процессами. Каждому периоду соответствует некоторая скорость изменения рефракционных поправок по углу места и дальности, а также её максимальные значения для рассматриваемых данных.

Однако в течение регулярных периодов могут возникать временные интервалы, характеризующиеся изменением метеопараметров, существенно превышающим средние значения для регулярных периодов. На рисунке 3 и 4 пунктирной линией показан возможный ход изменения метеопараметров и рефракционных поправок, характерный для регулярного периода. Однако наличие кратковременного ливневого дождя привело к появлению временного интервала существенного изменения метеопараметров и рефракционных поправок (интервал 4 на рисунках 3 и 4). При этом максимальная скорость изменения поправок по углу места и дальности составила 1.58 угл. мин. и 6.46 м соответственно.

Данные изменения превышают типовые изменения, как для переходных, так и для установившихся периодов. Соизмеримость временного интервала их существования с временным интервалом формирования траекторной информации по целям, сопровождаемыми РЛС ДО, требует введения оперативной компенсации их влияния на точность формирования траекторных измерений.

Предварительный анализ показывает, что наиболее целесообразным является частое измерение параметров среды и ввод соответствующих поправок. Однако на временном интервале слабого изменения параметров среды частый ввод поправок не рационален. С другой стороны, использование низкого темпа расчета и ввода поправки может привести к пропуску интервалов быстрого из-

менения параметров среды. Данный интервал соизмерим с временем формирования траекторных параметров цели в зоне ответственности. Это может привести к появлению больших ошибок единичных измерений и дополнительным ошибкам определения вектора состояния цели.

Таким образом, для оперативного учёта влияния среды необходим механизм определения периода резких изменений метеопараметров. Одним из критериев обнаружения таких периодов может быть превышение отклонения рассчитанной поправки заранее установленного значения (порога). Выбор порога должен осуществляться исходя из требований к точности алгоритма траекторной обработки (или его характеристик).

Работа алгоритма учёта резких изменений метеопараметров может быть построена следующим образом:

- на базе измерений метеопараметров (в нашем случае с темпом 10 секунд) осуществляется расчёт поправки;
- производится её сравнение с опорным для данного временного периода значением и расчет отклонения;
- отклонение сравнивается с установленным порогом.

Момент превышения рассчитанной поправки порога (например, по критерию 2 из 3) будет временем очередного ввода поправки. Это позволит не пропустить интервалы времени, когда ошибки определения координат существенно изменяется за короткий интервал времени.

Литература

1. Кобзарев Ю.Б. Современная радиолокация. – М.: Советское радио, 1969.
2. Бин Б.Р, Даттон Е.Дж. Радиометеорология. – Л.: Гидрометеиздат, 1971.
3. Рубцов А.В., Соколов К.С., Тармаев Н.Г. Региональная эмпирическая модель ионосферы в рамках алгоритма коррекции траекторных измерений. Сборник научных трудов конференции RLNC-2010, Том 2, с. 1276 – 1286.

4. 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, Том 2, с. 1253 – 1260.
5. Соколов К.С., Трекин В.В., Оводенко В.Б., Патронова Е.С. О возможных методах адаптации радиолокационных средств к геофизическим условиям функционирования. Электромагнитные волны и электронные системы, №5, т.17, 2012. С.68-72.
6. 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.
7. Atmospheric tracking errors at S and C-band frequencies by P.E. Schmid. Goddard Space Flight Center, NASA TN D-3470, Washington D.C., August 1966.
8. Андрианов, В.А. Методика коррекции влияния тропосферной рефракции при наземных траекторных измерениях ИСЗ / В.А. Андрианов, В.М. Смирнов //Препринт -14(565). ИРЭ АН СССР, 1991.-30 с.
9. Влияние рефракции миллиметровых и сантиметровых волн в атмосфере на угол места источника излучения. Паршуков В. А. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва, 2004 171 с.
10. M. Lopez, W. Vickers. Refraction correction of rocket tracking radar inputs in real time. Journal of the atmospheric sciences, Vol. 29, 1972, p.p. 893- 899.
11. Daniell, R., C. S. Carrano, G. Fishman, and N. Bonito (2007), A Computer Code for Calculating Tropospheric and Ionospheric Refraction Effects on Radar Systems, Proceedings of the 2007 IEEE Radar Conference, Waltham, MA, April 17-20, 2007.
12. Stephen, M.H.; Sigrid, C. & Anthony, V. Equatorial Atmospheric and Ionospheric modeling at Kwajalein Missile Range. *Lincoln Laboratory Manual*, 2000, 12(1), 45-64.

13. Effect of Troposphere and Ionosphere on C-Band Radar Track Data and Correction of Tracking Parameters. R.Varaprasad, S.Vijaya, Bhaskara Rao, V. Seshagiri Rao. Defence Science Journal, Vol. 62, No. 6, November 2012, pp. 417-423.
14. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии (физика атмосферы). – Л.: Гидрометеоиздат. 1976.
15. Седунов Ю. С. Атмосфера: справочник. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991.