

## Шумы в радиозатменных наблюдениях

М.Е. Горбунов

*Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии наук  
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3.  
E-mail: [gorbunov@ifaran.ru](mailto:gorbunov@ifaran.ru)*

*Изучены свойства аддитивного шума в радиозатменных данных четырех экспериментов: COSMIC, COSMIC-2, METOP-B, Spire. Получены статистические распределения шумового порога и найдены его наиболее вероятные значения. Получена зависимость статистики отклонения данных восстановления тропосферного индекса рефракции от анализов GFS, в зависимости от отношения сигнал/шум.*

*Ключевые слова: радиозатменное зондирование, индекс рефракции, отношение сигнал/шум*

## Noise in radio occultation observations

M.E. Gorbunov

*A.M.Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences  
119017, Moscow, Pyzhevsky per., 3.*

*We study the properties of the additive noise in radio occultation data from four missions: COSMIC, COSMIC-2, METOP-B, and Spire. We obtain the statistical distributions of the noise floor and find its most probable values. We infer the dependence of the statistics of the deviation of the retrieved tropospheric refractivity from the GFS analyses, as a function of signal-to-noise ratio.*

*Keywords: radio occultation, refractive index, signal-to-noise ratio*

## Введение

В данной работе рассмотрено влияние отношения сигнал/шум радиозатменных сигналов на ошибки восстановления тропосферного показателя преломления. Отношение сигнал/шум характеризует интенсивность электромагнитного поля, записанного бортовым приемником на низкоорбитальном спутнике. Оно измеряется в В/В и определяется как отношение полезного сигнала к внутреннему шуму приемника.

Шум в радиозатменных наблюдениях может быть мультипликативным и аддитивным. Примером мультипликативного шума является модуляция сигнала случайными атмосферными и ионосферными неоднородностями, которая переходит в вариации фазы и относительной амплитуды, не завися от интенсивности сигнала. Ионосферная коррекция накладывает основное ограничение на восстановление нейтрального индекса рефракции выше 30 км [1,2,3].

Отношение сигнал/шум определяется для аддитивного шума. Тогда как мультипликативный шум становится существенным на больших высотах, где фазовые вариации за счет нейтральной атмосферы малы, аддитивный шум становится важным в нижней тропосфере, где амплитуда сигнала падает за счет регулярного рефракционного ослабления. Отношение сигнал/шум считается лимитирующим фактором для наблюдения глубоких радиозаходов в присутствии интенсивных слоев влажности [4].

В настоящее время предложены и реализованы системы радиозатменного зондирования с использованием антенн с высоким коэффициентом усиления. Прежде всего, следует упомянуть METOP-B [5,6,7] и COSMIC-2 (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate) [8,9]. Существуют также коммерческие миссии

с высоким уровнем сигнала за счет антенн с большой апертурой, такие как PlanetIQ [10], которые, как ожидается, позволят добиться улучшения качества восстановления параметров тропосферы. Существует также миссия GeoOptics, основанная на CICERO (Community Initiative for Cellular Earth Remote Observation) [11] с характеристиками антенны близкими к COSMIC.

В качестве альтернативы к миссиям с высоким уровнем сигнала, можно указать миссию Spire, основанную на большом созвездии спутников с малым форм-фактором, оснащенных антеннами с относительно низким коэффициентом усиления. Как было показано, данные Spire также обеспечивает хорошее качество восстановления [12,13,14,15,16].

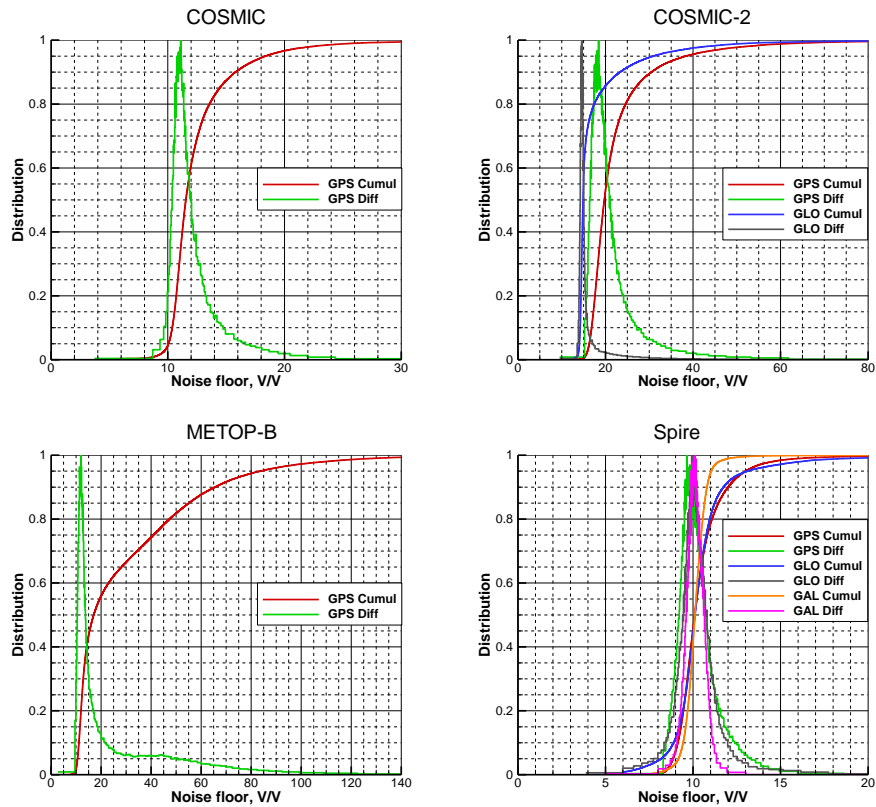
Как следует из анализа наблюдений COSMIC-2 [8,9], высокое отношение сигнал/шум важно для обнаружения глубоких сигналов в тропической тропосфере. Сигналы, наблюдаемые глубоко ниже лимба планеты, соответствуют большим узким выбросам на профиле угла рефракции, и поэтому их амплитуда очень низка. Такие события представляют интерес для изучения планетарного пограничного слоя [17]. Тем не менее, систематическое обнаружение многолучевого распространения и сверхрефракции, что необходимо для целей численного прогноза погоды и изучения планетарного пограничного слоя, также возможно для миссий с низким уровнем сигнала [13].

В этой работе мы анализируем влияние аддитивного шума на качество обращения радиозатменных данных. Отношение сигнал/шум обычно определяется как наблюдаемый сигнал, нормированный на внутренний шум приемника. Фактический уровень шума существенно выше, и он оценивается по шумовому порогу, определяемому как уровень сигнала в теневой зоне. Мы определяем статистическое распределение величины шумового порога для разных миссий с систем спутниковой навигации. Мы вводим два типа нормировки сигнала: 1) на динамическую величину шумового порога для текущего сеанса наблюдений и 2) на наиболее вероятную величину шумового порога.

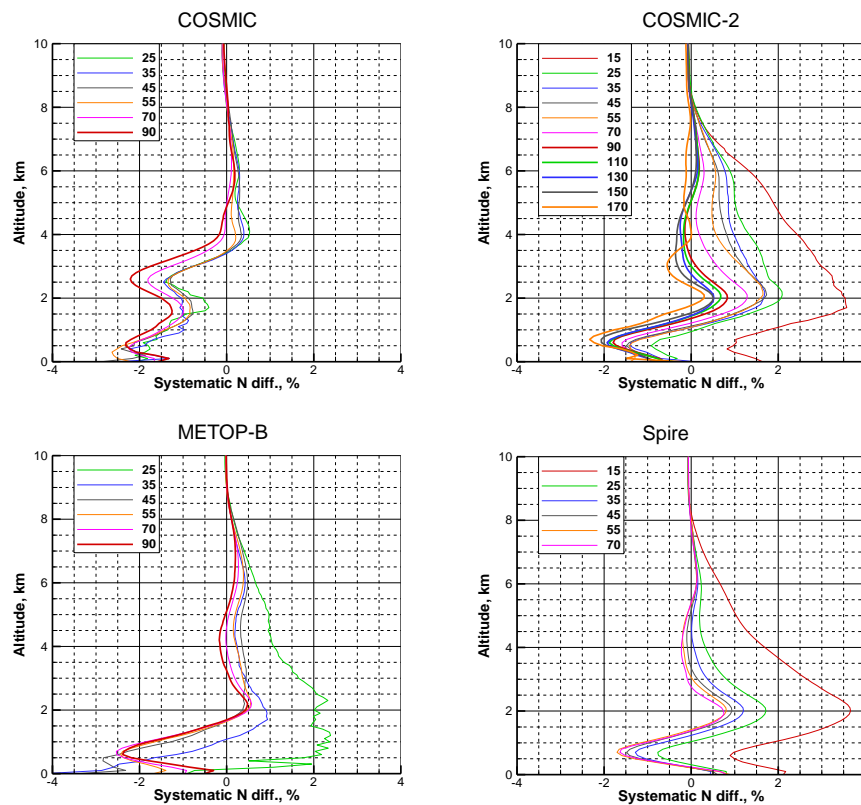
Мы анализируем данные четырех миссий: COSMIC, COSMIC-2, METOP-B и Spire. В качестве реперных данных мы используем данные Глобальной Системы Прогнозов (Global Forecast System GFS). Для каждого сеанса наблюдений мы определяем динамически и статически нормированное отношение сигнал/шум, которое определяется как средняя амплитуда сигнала на высотах 60–80 км к динамическому или статическому шумовому порогу. Величины отношения сигнал/шум делятся на интервалы, для каждого из которых мы вычисляем статистику разности индекса рефракции, восстановленного по радиозатменным данным и вычисленного по полям GFS. В конечном итоге мы получаем зависимость статистики от отношения сигнал/шум.

### **Результаты**

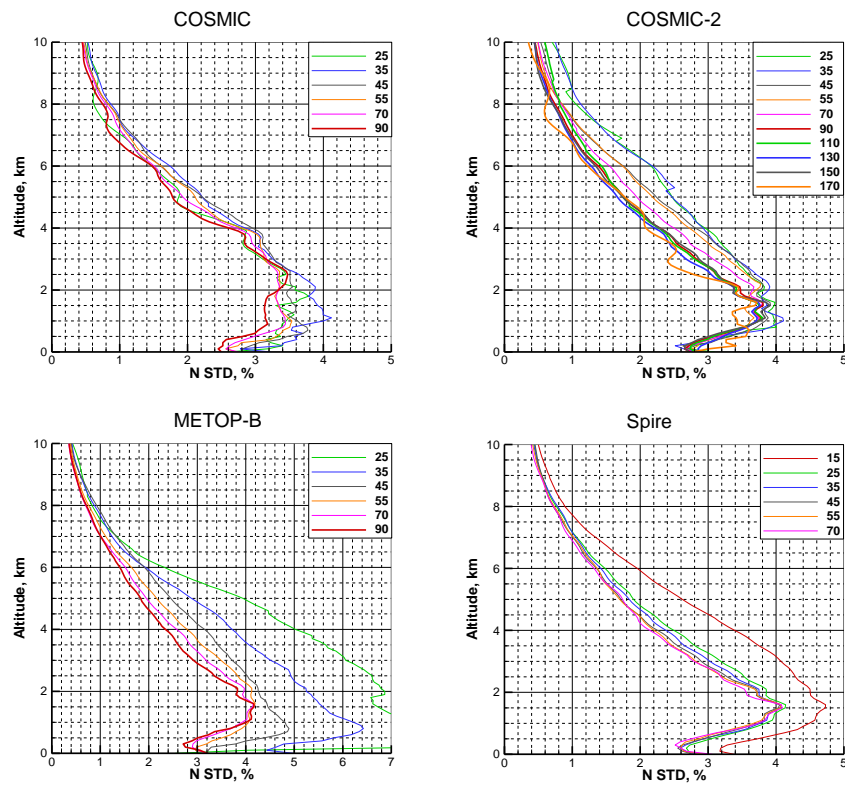
Для COSMIC мы использовали 24 дня 2008-го года (1-й и 15-й день каждого месяца), всего 61905 сеансов (только GPS). Для COSMIC-2, мы использовали 24 дня 2020 (1-й и 15-й день каждого месяца), всего 107173 сеансов: 69657 GPS и 37518 ГЛОНАСС. Для METOP-B мы использовали данные за весь 2020 год, всего 196,158 сеансов (только GPS). Для Spire мы выбрали 24 дня 2020 года (1-й и 15-й день каждого месяца) и 8 дней 2021 года (1, 8, 15, и 22 июня и июля), всего 282824 сеансов: 113039 GPS, 77821 ГЛОНАСС, 83707 Galileo и 8276 QZSS. Результаты статистического анализа представлены на рисунках 1–7.



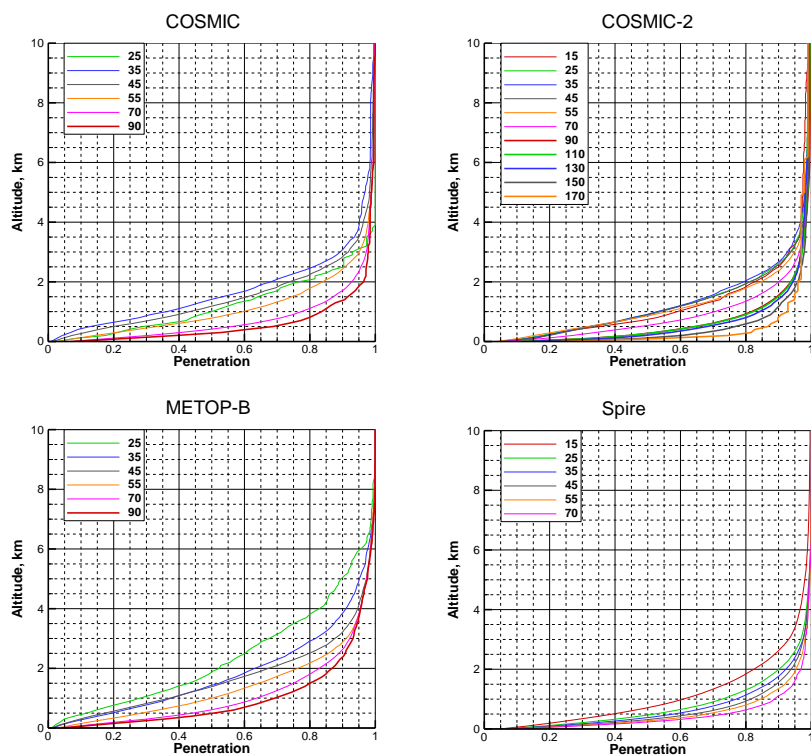
**Рис. 1. Распределения шумового порога для различных радиозатменных экспериментов и используемых глобальных навигационных спутниковых систем**



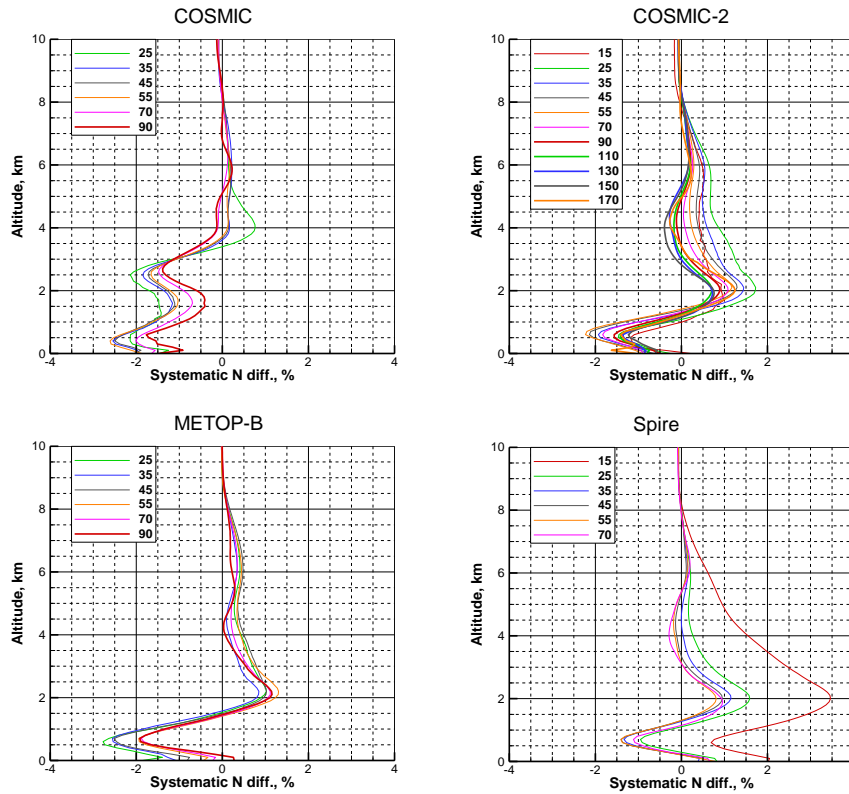
**Рис. 2. Систематическое отклонение восстановленного показателя преломления в тропиках для различных радиозатменных экспериментов в зависимости от отношения сигнал/шум в статической нормировке**



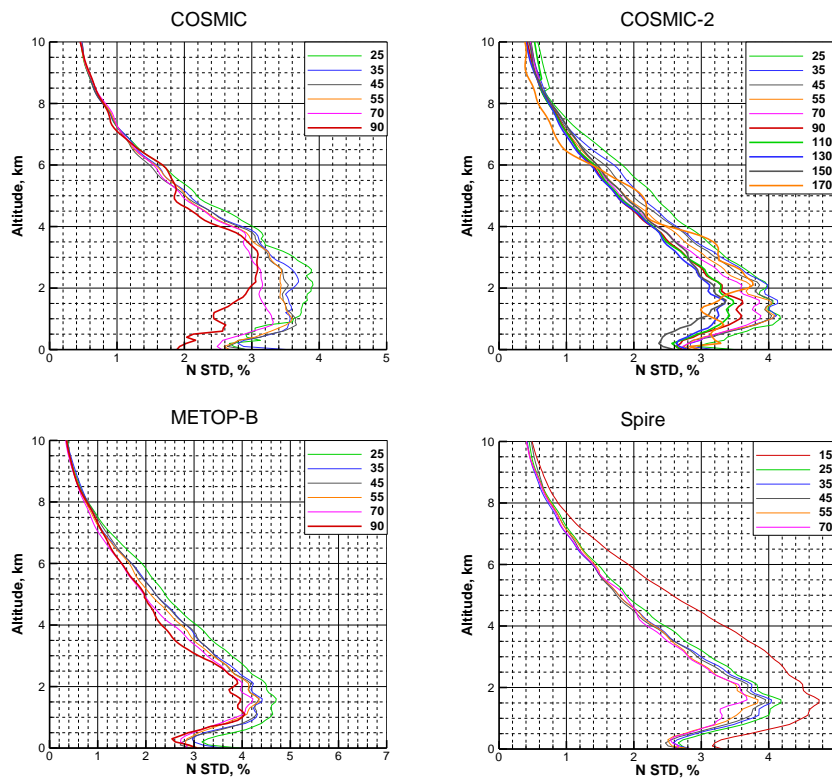
**Рис. 3. Стандартное отклонение восстановленного показателя преломления в тропиках для различных радиозатменных экспериментов в зависимости от отношения сигнал/шум в статической нормировке**



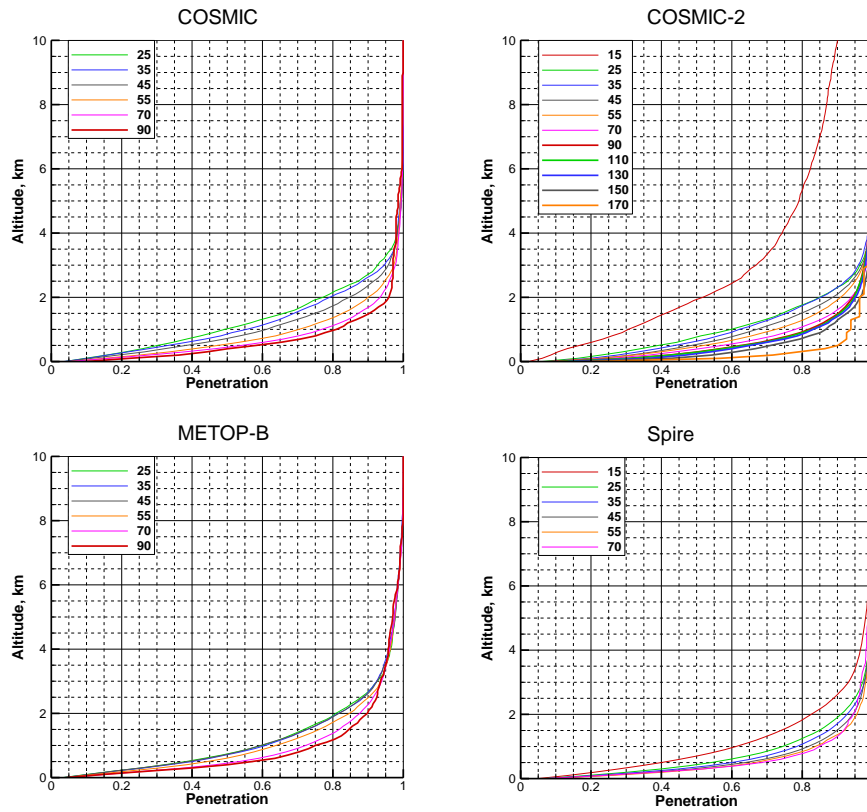
**Рис. 4. Доля профилей, достигающих заданной высоты, в тропиках для различных радиозатменных экспериментов в зависимости от отношения сигнал/шум в статической нормировке**



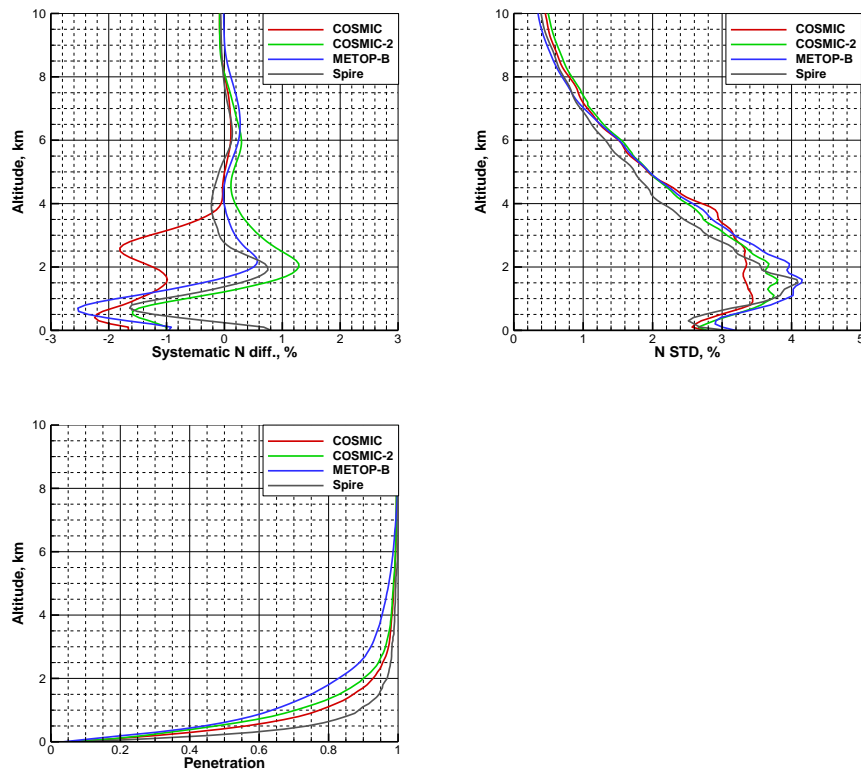
**Рис. 5. Систематическое отклонение восстановленного показателя преломления в тропиках для различных радиозатменных экспериментов в зависимости от отношения сигнал/шум в динамической нормировке**



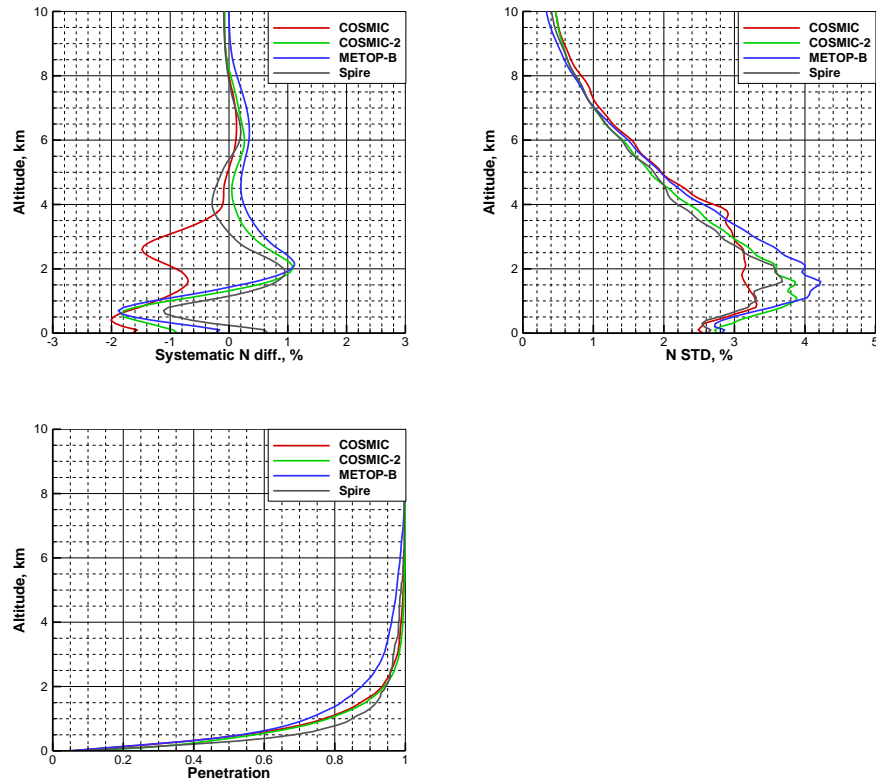
**Рис. 6. Стандартное отклонение восстановленного показателя преломления в тропиках для различных радиозатменных экспериментов в зависимости от отношения сигнал/шум в динамической нормировке**



**Рис. 7. Доля профилей, достигающих заданной высоты, в тропиках для различных радиозатменных экспериментов в зависимости от отношения сигнал/шум в статической нормировке**



**Рис. 8. Статистические характеристики для всех миссий при фиксированной отношении сигнал/шум 70 в статической нормировке**



**Рис. 9. Статистические характеристики для всех миссий при фиксированной отношении сигнал/шум 70 в динамической нормировке**

### Выводы

Увеличение отношения сигнал/шум улучшает глубину зондирования и снижает величину стандартного отклонения профилей индекса рефракции. Во многих случаях стандартное отклонение демонстрирует эффект насыщения. Зависимость стандартного отклонения от отношения сигнал/шум оказывается более сильной для динамической нормировки. Этот эффект особо сильно проявляется в данных COSMIC.

Систематическое отклонение является сложным эффектом, вызываемым несколькими механизмами, и его зависимость от отношения сигнал/шум не столь очевидна. В качестве приближенного правила можно принять, что систематическое отклонение становится более отрицательным при росте статически нормированного отношения сигнал/шум, и его абсолютная величина убывает при росте динамически нормированного отношения сигнал/шум.

Использование нормированного отношения сигнал/шум упрощает сравнение между собою различных миссий. Тем не менее, даже при той же величине нормированного отношения сигнал/шум, статистические результаты для разных миссий различаются. Это указывает на то, что простая модель аддитивного шума является приближением, и структура сигнала для разных миссий различается. Возможно, необходим учет мультипликативного или нелинейного шума.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №20-05-00189.*

### Литература

1. Syndergaard S. On the ionosphere calibration in GPS radio occultation measurements // Radio Sci. 2000, 35(3), 865–883.

2. Gorbunov M. E. Ionospheric correction and statistical optimization of radio occultation data // *Radio Sci.* 2002, 37, 17-1–17-9.
3. Sokolovskiy S., Schreiner W., Rocken C. and Hunt D. (), 'Optimal Noise Filtering for the Ionospheric Correction of GPS Radio Occultation Signals // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2009, 26, 1398--1403.
4. Sokolovskiy S., Schreiner W., Zeng Z., Hunt D., Lin Y.-C. and Kuo Y.-H. Observation, analysis, and modeling of deep radio occultation signals: Effects of tropospheric ducts and interfering signals // *Radio Sci.* 2014, 49(10), 954–970.
5. Bonnedal M., Christensen J., Carlström A. and Berg A. Metop-GRAS in-orbit instrument performance // *GPS Solutions* 2010, 14, 109–120.
6. Schreiner W., Sokolovskiy S., Hunt D., Rocken C. and Kuo Y.-H. Analysis of GPS radio occultation data from the FORMOSAT-3/COSMIC and Metop/GRAS missions at CDAAC // *Atmos. Meas. Tech.* 2011, 4(10), 2255--2272.
7. Xu X. and Zou X. Comparison of MetOp-A/-B GRAS radio occultation data processed by CDAAC and ROM // *GPS Solutions* 2020, 24(1).
8. Sokolovskiy S., Schreiner W., Weiss J., Zeng Z., Hunt D. and Braun J. Initial Assessment of COSMIC-2 Data in the Lower Troposphere // *Joint 6th ROM SAF Data User Workshop and 7th IROWG Workshop*, 19–25 September 2019, Konventum, Elsinore, Denmark.
9. Schreiner W. S., Weiss J. P., Anthes R. A., Braun J., Chu V., Fong J., Hunt D., Kuo Y.-H., Meehan T., Serafino W., Sjoberg J., Sokolovskiy S., Talaat E., Wee T. K. and Zeng Z. COSMIC-2 Radio Occultation Constellation: First Results // *Geophys. Res. Lett.* 2020, 47(4).
10. Kursinski E. R. Weather & Space Weather RO Data from PlanetiQ Commercial GNSS RO // *Joint 6th ROM SAF Data User Workshop and 7th IROWG Workshop*, 19–25 September 2019, Konventum, Elsinore, Denmark.
11. Chang H., Lee J., Wang Y., Breitsch B. and Morton Y. J. Preliminary Assessment of CICERO Radio Occultation Performance by Comparing with COSMIC I Data // *Proceedings of the 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation*, Institute of Navigation, 2020.
12. Irisov V., Duly T., Nguyen V., Masters D., Nogues-Correig O., Tan L., Yuasa T. and Ector D. Recent radio occultation profile results obtained from Spire CubeSat GNSS-RO constellation // *AGU Fall Meeting*, 2018.
13. Gorbunov M., Koval O. and Kirchengast G. Kirkwood Distribution Function and its Application for the Analysis of Radio Occultation Observations // *Joint 6th ROM SAF User Workshop and 7th IROWG Workshop*, EUMETSAT ROM SAF, Konventum, Elsinore, Denmark, 2019.
14. Irisov V., Nguyen V., Duly T., Nogues-Correig O., Tan L., Yuasa T., Masters D., Sikarin R., Gorbunov M. and Rocken C. Radio Occultation Observations and Processing from Spire's CubeSat Constellation // *Joint 6th ROM SAF User Workshop and 7th IROWG Workshop*, EUMETSAT ROM SAF, Konventum, Elsinore, Denmark, 2019.
15. Bowler N. E. An assessment of GNSS radio occultation data produced by Spire, Technical report 640, MetOffice, 2020.
16. Lonitz K., Marquardt C., Bowler N. and Healy S. Final Technical Note of Impact assessment of commercial GNSS-RO data, Technical report 4000131086/20/NL/FF/a, European Centre for Medium Range Weather Forecasts, Shinfield Park, Reading, RG2 9AX, UK, 2021.
17. Sokolovskiy S., Kuo Y.-H., Rocken C., Schreiner W. S., Hunt D. and Anthes R. A. Monitoring the atmospheric boundary layer by GPS radio occultation signals recorded in the open-loop mode // *Geophys. Res. Lett.* 2006, 33(12), L12813.