

Статистическое исследование волноводного распространения в тропосфере

М.Е. Горбунов^{1,2}

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской Академии Наук
119017, Москва, Пыжевский пер. 3

E-mail: gorbunov@ifaran.ru

² Гидрометцентр России
123376, Москва, Б. Предтеченский пер. 13-1

Мы используем модификацию метода канонических преобразований для обнаружения сверхрефракции и определения параметров волновода по радиозатменным наблюдениям. Метод позволяет напрямую определить прицельную высоту луча, касающегося волновода. Для пересчета прицельной высоты в геометрическую высоту перигея используется восстановленный профиль индекса рефракции. Метод также позволяет определить интенсивность и толщину волновода. Мы исследуем статистику параметров волноводов по данным спутника METOP-B за 2025 г.

Ключевые слова: радиозатменное зондирование; сверхрефракция; волновая оптика; канонические преобразования

Statistical study of ducting in the troposphere

M.E. Gorbunov^{1,2}

¹ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences

² Hydrometcenter of Russia

We use a modification of the canonical transform method for detecting ducting, or superrefraction and the determination the duct parameters from radio occultation observations. The method immediately provides the impact height of the ray touching the duct. In order to evaluate the geometric perigee height from the impact height, we use the retrieved refractivity profile. The method gives two further parameters: the strength and the width of the duct. We study the statistics of the duct parameters in the troposphere from METOP-B observations for year 2025.

Keywords: radio occultations, ducting, wave optics, canonical transforms

Введение

Сверхрефракция, или волноводное распространение возникает в присутствии сильных вертикальных градиентов индекса рефракции. [1]. В радиозатменных экспериментах точка перигея луча, соединяющего передатчик и приемник, может находиться только вне слоя сверхрефракции, или волновода. В этом случае применение стандартных методов обработки данных приводит к систематической ошибке восстановления индекса рефракции [1]. Наиболее значительные эффекты сверхрефракции и систематические ошибки восстановления индекса рефракции наблюдаются в морском пограничном слое [2, 3, 4, 5]. В [2] отмечены пять основных максимумов: в районе западного берега Северной Америки, в Южной Америке (Чили и Перу), в Северной Африке (пустыня Сахара), в Южной Африке и в Австралии. Систематические отрицательные ошибки обращения радиозатменных данных растут в условиях облачного пограничного слоя, особенно над Тихим и Атлантическим океанами [5].

В [6] выполнено сравнение эффектов сверхрефракции для данных радиозондов и ERA5 при помощи геометрикооптического численного моделирования. Пиковое медианное значение систематической ошибки индекса рефракции N для радиозондов было найдено равным -5.42% , а для ERA5 -2.96% . В [7, 8, 9] рассмотрены методы коррекции отрицательной систематической ошибки профилей индекса рефракции ниже волноводов с использованием различных физических ограничений.

Радиоголографический метод обнаружения сверхрефракции был развит в [10]. Он основан на модели радиозатменного сигнала, предсказывающей доплеровский сдвиг частоты с точностью 5–10 Гц [11]. Для понижения частоты исходный комплексный сигнал делится на модель. Далее вычисляется спектр мощности сигнала с пониженной частотой во временном интервале, соответствующим высотам перигея прямых лучей от -250 до -350 км. Сверхрефракция приводит к узкому пику спектра в районе 0 Гц. Отношение максимума спектра к оценке фоновому шуму является метрикой, позволяющей идентифицировать сверхрефракцию.

В данной работе мы используем метод идентификации сверхрефракции на основе метода канонических преобразований [12]. Исходное комплексное поле как функция времени $u(t)$ при помощи интегрального оператора Фурье преобразуется в представление прицельного параметра $\hat{u}(p)$. Преобразование применяется к фрагменту записи, соответствующий углам рефракции, превосходящим заданный порог. Это аналогично выделению интервала высот перигеев прямых лучей в [10]. Максимум амплитуды поля в представлении прицельного параметра $|\hat{u}(p)|$ расположен в районе волновода. Это позволяет оценивать его интенсивность, высоту и толщину. Мы приведем результаты статистического анализа сверхрефракции для радиозатменных данных спутник МЕТОР-В за 2024 год.

Метод

На рис. 1 показана геометрия радиозатменного зондирования в присутствии атмосферного волновода. Пик профиля угла рефракции $\epsilon(p)$ как функции прицельного параметра p при перигее луча около границы волновода приводит к тому, что при измерениях волнового поля на низкоорбитальном спутнике наблюдается многолучевое распространение. Для определения профиля $\epsilon(p)$ используются методы волновой оптики. Из $\epsilon(p)$ далее восстанавливается профиль атмосферного индекса рефракции [13].

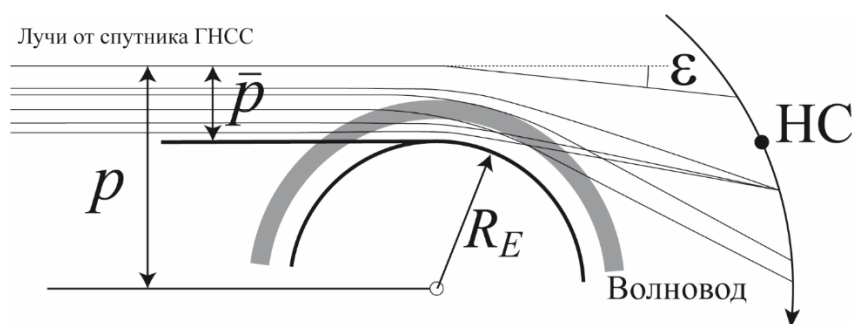


Рис. 1. Геометрия радиозатменного зондирования. Радиолучи от спутника Глобальной системы спутниковой навигации (ГНСС) преломляются земной и атмосферой и принимаются на низкоорбитальном спутнике (НС).

Интегральный оператор Фурье 2-го типа, преобразующий осциллирующее волновое поле в представление прицельного параметра, имеет форму [12, 14, 13]:

$$\tilde{u}(p) \equiv A'(p) \exp\left(-\int \epsilon(p') dp'\right) = \hat{\Phi}_2[u(t)] = \sqrt{\frac{-ik}{2\pi}} \int a_2(p, t) \exp(ikS_2(p, t)) u(t) dt, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число и λ – длина волны. Фазовая функция $S_2(p, t)$ устанавливается методами геометрической оптики, тогда как амплитудная функция $a_2(p, t)$ вычисляется из условия локального сохранения энергии. Профиль угла рефракции $\epsilon(p)$ связан с производной фазы преобразованного поля $\tilde{u}(p)$.

Обозначим через $t_s(p)$ время приема луча с прицельной высотой p . В момент времени t к приемнику приходят, вообще говоря, несколько лучей с прицельными высотами p_i , удовлетворяющими $t_s(p_i) = t$. Величины $|u(t)|^2$ и $|\tilde{u}(p)|^2$ являются плотностями энергии в представлениях времени и прицельного параметра соответственно, а преобразование $\hat{\Phi}_2$ перераспределяет энергию между ними.

Это показано на рис. 2. На левой панели представлена исходная амплитуда $|u(t_0(\bar{p}))|$ как функция оценки прицельной высоты над лимбом планеты $\bar{p} = p - R_E$, где p – прицельный параметр (прицельная высота) по отношению к центру Земли, и R_E – локальный радиус кривизны сечения стандартного эллипсоида плоскостью радиозахода (рис. 1) [15]. Оценка основана на модели фазовой задержки, позволяющей оценить время $t_0(\bar{p}) \approx t_s(\bar{p})$ приема луча с прицельным параметром \bar{p} . На правой панели показана амплитуда преобразованного поля $\tilde{u}(\bar{p})$. В идеальном случае атмосферы без поглощения и горизонтальных градиентов $\tilde{u}(\bar{p})$ близка к θ -функции [14]. В данном примере сильные эффекты многолучевости в интервале прицельной высоты $\bar{p} \in [2, 6]$ км проявляются в наблюдаемой амплитуде $|u(t_0(\bar{p}))|$ и в сглаженной в амплитуде преобразованного поля $\tilde{u}(\bar{p})$. Прицельная высота $\bar{p} = 4$ км идентифицируется как верхняя граница атмосферного пограничного слоя. Сцинтилляции амплитуды преобразованного поля $\tilde{u}(\bar{p})$ в данном интервале прицельной высоты связаны с горизонтальными градиентами атмосферного индекса рефракции, тогда как сцинтилляции наблюдаемой амплитуды $|u(t_0(\bar{p}))|$ связаны с многолучевым распространением.

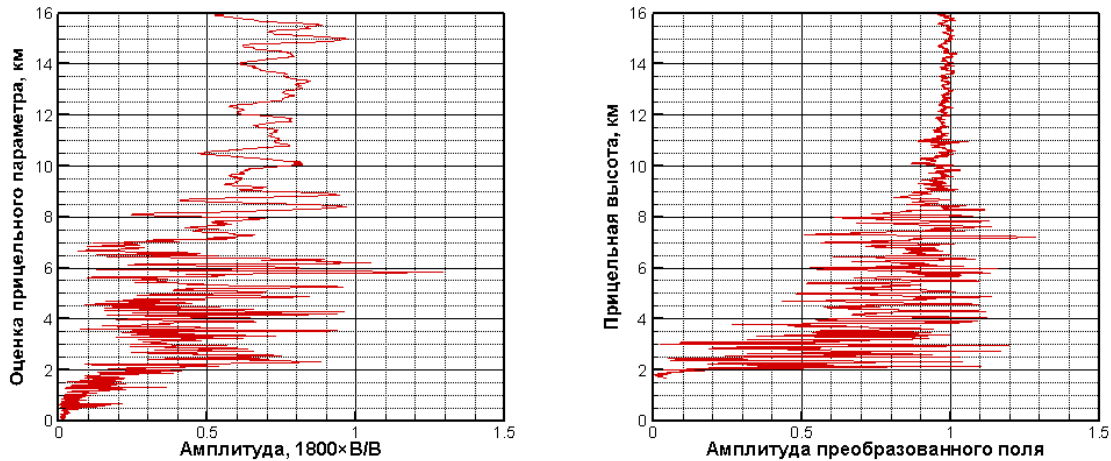


Рис. 2. Сеанс наблюдений COSMIC-2, 2020/05/15, UTC 03:50, 23.16°S 178.57°W. Слева: Исходная амплитуда $|u(t_0(\bar{p}))|$ как функция оценки прицельной высоты. Справа: Амплитуда преобразованного поля $|\tilde{u}(\bar{p})|$ как функция прицельной высоты.

Более глубокое понимание структуры радиозатменного сигнала дает частотно-временной анализ, основанный на функции Вигнера [16], как показано на рис. 3. Ниже 4 км наблюдается сильный пик угла рефракции величиной 0.05, вызванный сверхрефракцией.

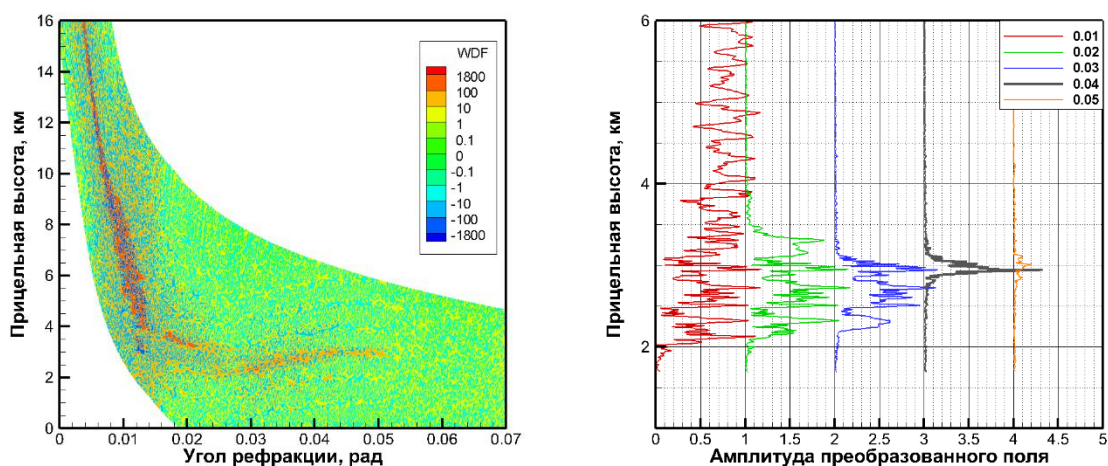


Рис. 3. Сеанс наблюдений COSMIC-2, 2020/05/15, UTC 03:50, 23.16°S 178.57°W. Слева: Функция Вигнера в координатах угол рефракции – прицельная высота. Справа: Амплитуда преобразованного поля $|\tilde{u}(\tilde{p})|$ для разных предельных углов рефракции. Кривые последовательно сдвинуты на 1.

Статистический анализ

Статистический анализ распределения сверхрефракции был выполнен по данным спутника METOP-B за 2024 год. METOP-B был выбран, поскольку его наблюдения распределены по всем широтам, в отличие от наблюдений COSMIC-2, ограниченных полосой 45°S–45°N. Всего было обработано 184542 сеансов, из которых в 25014 случаях была обнаружена сверхрефракция. Показаны распределения трех параметров: интенсивность, высота и толщина волновода.

На рис. 4, 5, 6 и 7 приведены распределения интенсивности волноводов по сезонам. Кластеры волноводов с высокой интенсивностью зимой смещаются на юг, а летом – на север. Результаты согласуются с [17, 18].

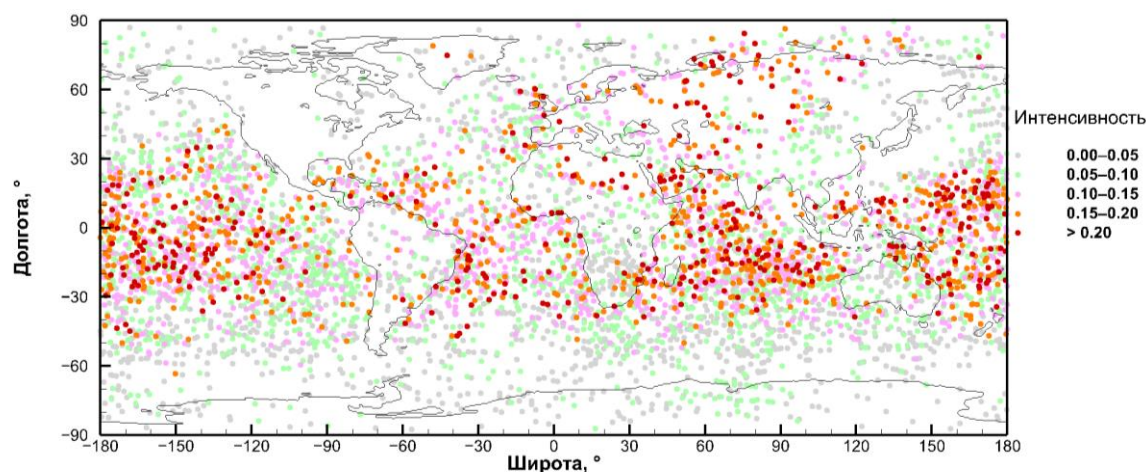


Рис. 4. Распределение интенсивности волноводов по данным METOP-B, зима 2024. Значения цвета точек указаны в легенде.

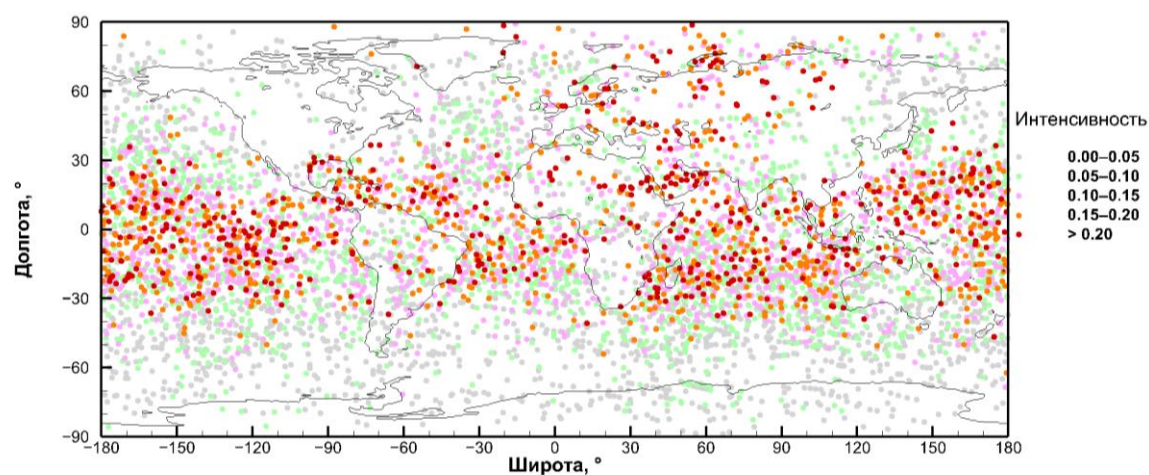


Рис. 5. Распределение интенсивности волноводов по данным МЕТОР-В, весна 2024.
Значения цвета точек указаны в легенде.

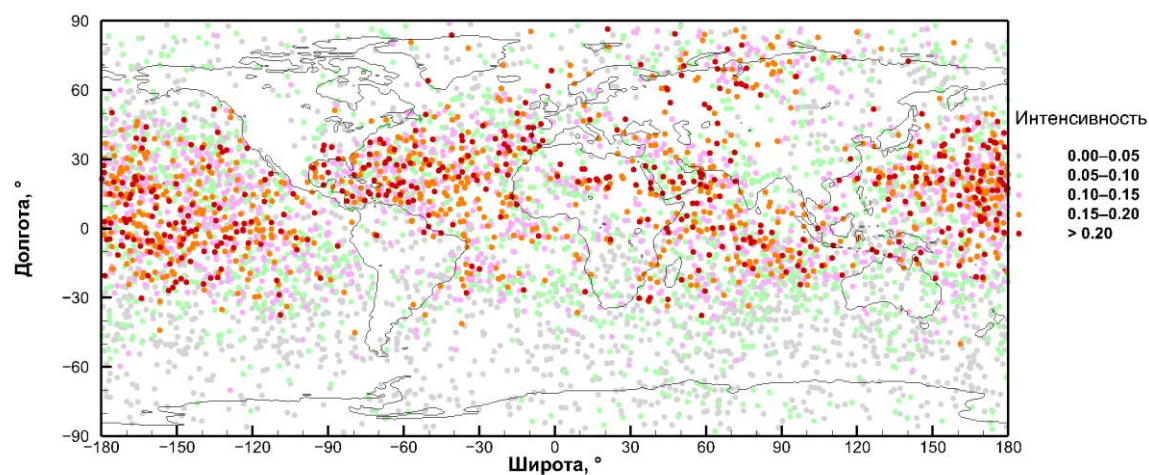


Рис. 6. Распределение интенсивности волноводов по данным МЕТОР-В, лето 2024.
Значения цвета точек указаны в легенде.

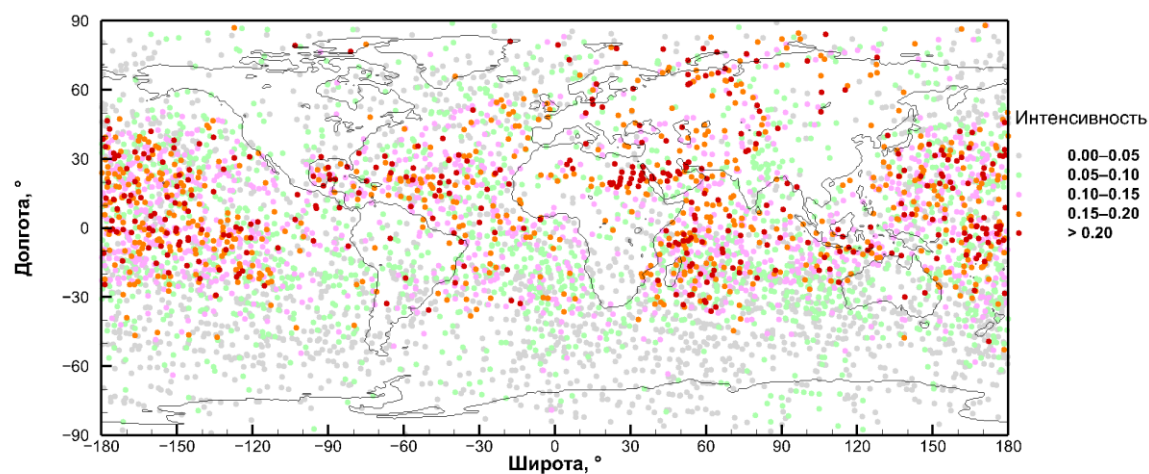


Рис. 7. Распределение интенсивности волноводов по данным МЕТОР-В, осень 2024.
Значения цвета точек указаны в легенде.

На рис. 8, 9, 10, 11 приведены распределения ширины волноводов по сезонам. Для океанов в тропиках характерны ширины волноводов 0.5–1 км. Для океанов в средних широтах волноводы шире, 1–2 км.

На рис. 12, 13, 14 и 15 приведены распределения высоты волноводов по сезонам. Они согласуются с анализом высоты волноводов на широком статистическом материале [18], показывающем, что ширина волноводов очень изменчива. Метод канонических преобразований напрямую дает прицельную высоту волновода, в отличие от оценки, основанной на вариации угла рефракции [18, 19], требующей подбора параметров.

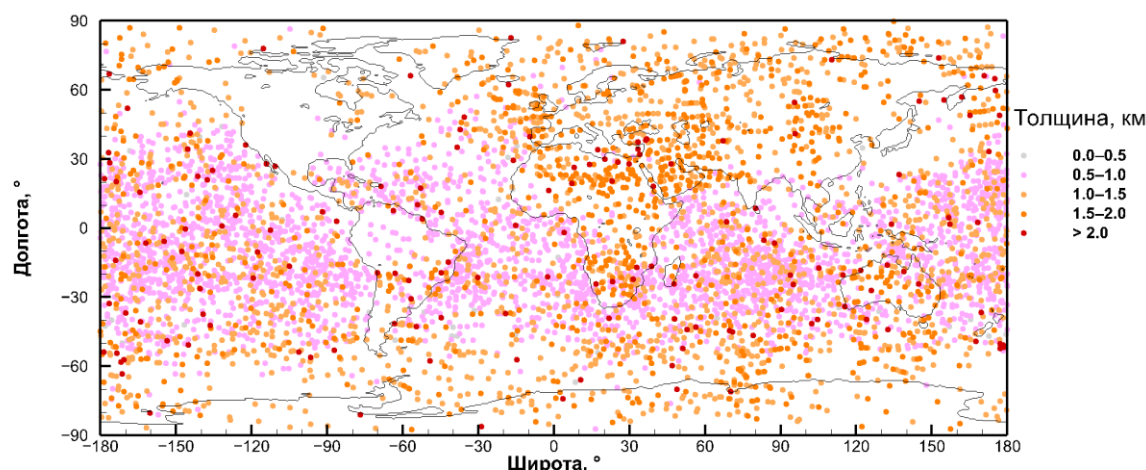
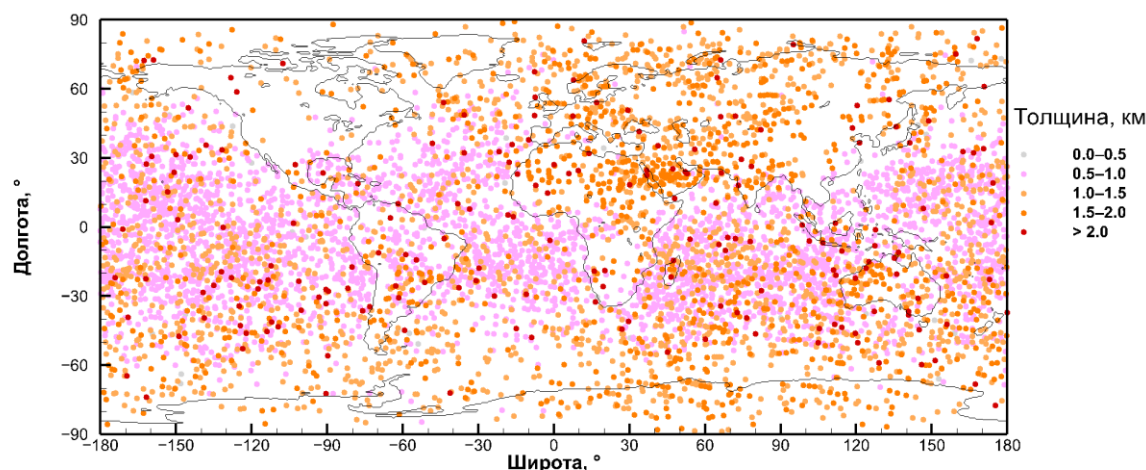
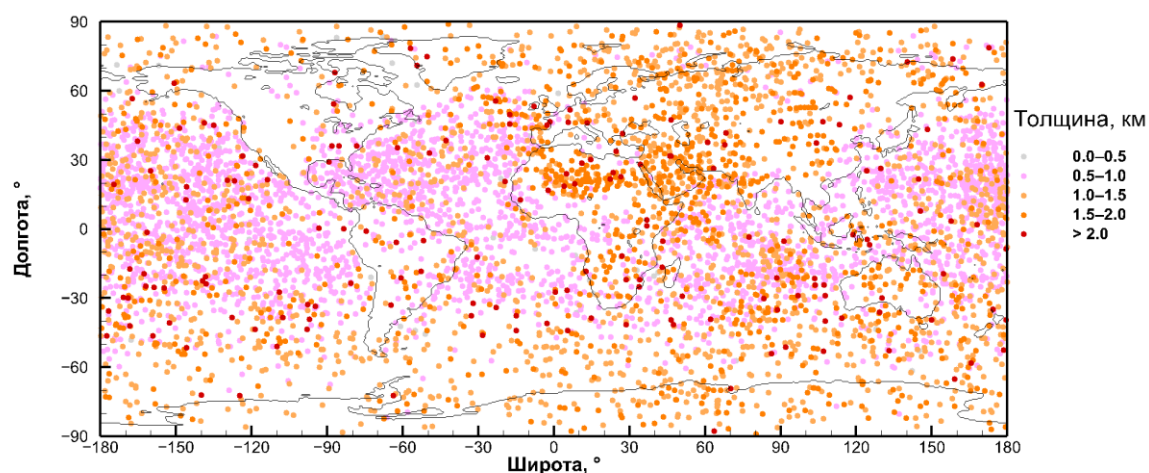


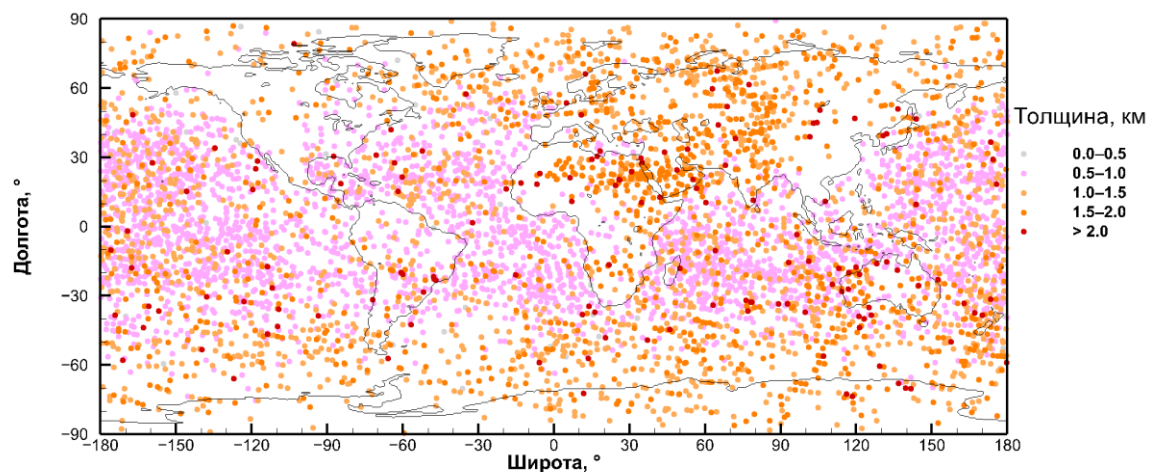
Рис. 8. Распределение толщин волноводов по данным МЕТОР-В, зима 2024. Значения цвета точек указаны в легенде.



9. Распределение толщин волноводов по данным МЕТОР-В, весна 2024. Значения цвета точек указаны в легенде.



10. Распределение толщин волноводов по данным МЕТОР-В, лето 2024. Значения цвета точек указаны в легенде.



11. Распределение толщин волноводов по данным МЕТОР-В, осень 2024. Значения цвета точек указаны в легенде.

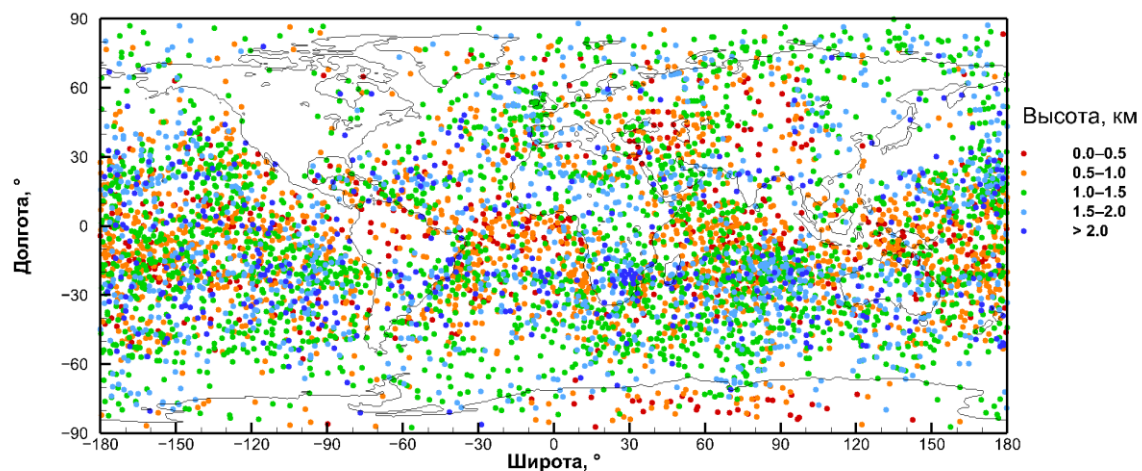


Рис. 12. Распределение высот волноводов по данным МЕТОР-В, зима 2024. Значения цвета точек указаны в легенде.

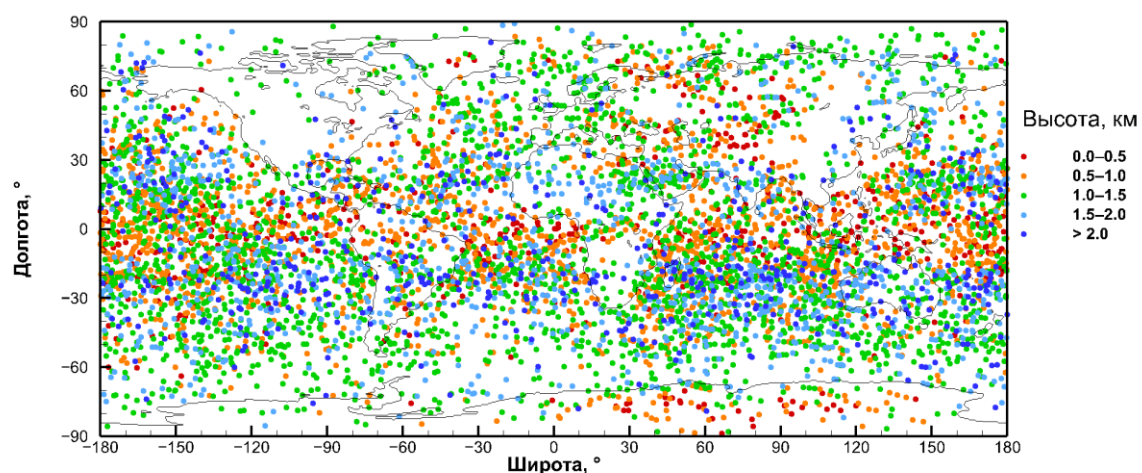


Рис. 13. Распределение высот волноводов по данным МЕТОР-В, весна 2024. Значения цвета точек указаны в легенде.

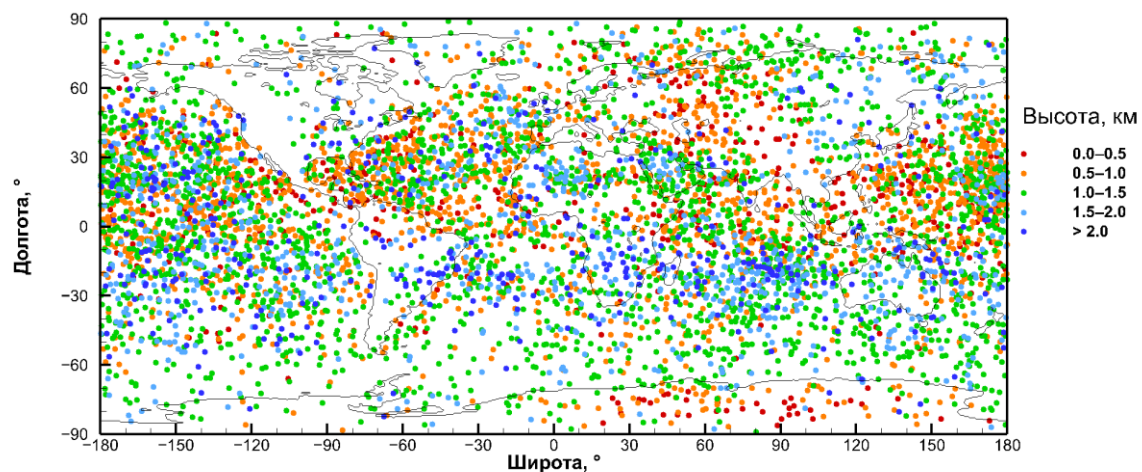


Рис. 14. Распределение высот волноводов по данным МЕТОР-В, лето 2024. Значения цвета точек указаны в легенде.

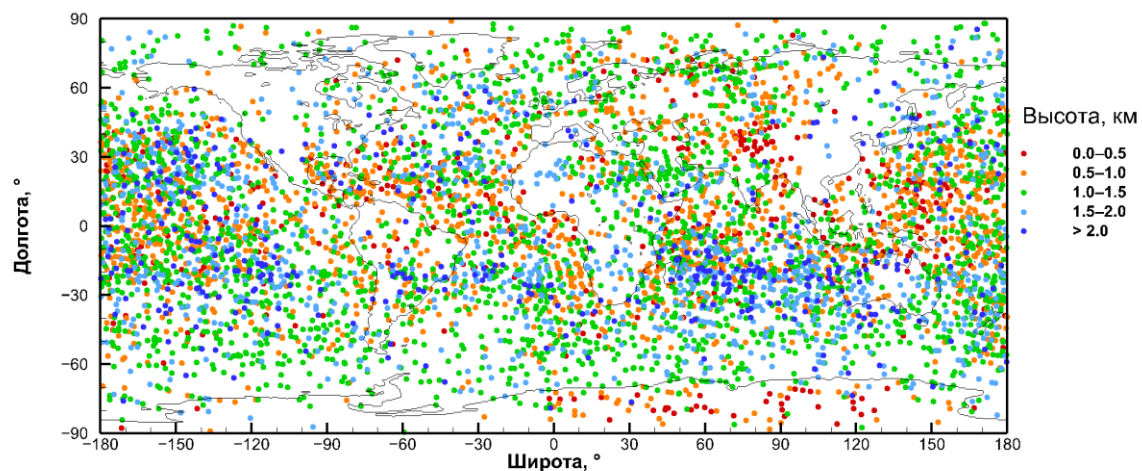


Рис. 15. Распределение высот волноводов по данным МЕТОР-В, осень 2024. Значения цвета точек указаны в легенде.

Выводы

Наш метод обеспечивает метрику (интенсивность волновода) в интервале $[0,1]$. Два других вычисляемых параметра волновода – это прицельная высота и толщина. Для преобразования прицельной высоты в геометрическую мы используем восстановленный профиль индекса рефракции. Отрицательная систематическая ошибка восстановления индекса рефракции появляется ниже волновода.

Мы провели валидацию метода на основе одного года наблюдений МЕТОР-В, включающего около 184542 сеансов. Результаты нашего метода согласуются с результатами других авторов. Так, выделяются кластеры волноводного распространения над Тихим, Атлантическим и Индийским океанами, а также над Сахарой. Многолетнюю статистику сверхрефракции можно найти в цитированной литературе. Исследование связи между тремя параметрами волновода и моделями профиля индекса рефракции является направлением для будущей работы.

Разделы «Введение» и «Метод» работы выполнены при финансовой поддержке государственного задания Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (FMWR-2025-0002, рег. карта 125020601652-8). Разделы «Статистический анализ» и «Выводы» работы выполнены при финансовой поддержке государственного задания Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (тема 17.1).

Литература

1. Sokolovskiy S.V. Effect of Super Refraction on Inversions of Radio Occultation Signals in the Lower Troposphere // Radio Science. 2003. V. 38. No. 3. Article 1058. DOI: 10.1029/2002RS002728.
2. Xie F., Wu D.L., Ao C.O., Kursinski E.R., Mannucci A.J., Syndergaard S. Super-Refraction Effects on GPS Radio Occultation Refractivity in Marine Boundary Layers // Geophysical Research Letters. 2010. V. 37. No. 11. Article L11805. DOI: 10.1029/2010GL043299.
3. Feng X., Xie F., Ao C.O., Anthes R.A. Ducting and Biases of GPS Radio Occultation Bending Angle and Refractivity in the Moist Lower Troposphere // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2020. V. 37. No. 6. P. 1013–1025. DOI: 10.1175/JTECH-D-19-0206.1.
4. Pham G.H., Yang S.-C., Chang C.-C., Chen S.-Y., Huang C.Y. Estimating the Refractivity Bias of FORMOSAT-7/COSMIC-2 Global Navigation Satellite System (GNSS) Radio Occultation in the Deep Troposphere // Atmospheric Measurement Techniques. 2024. V. 17. No. 11. P. 3605–3623. DOI: 10.5194/amt-17-3605-2024.
5. Hordyniec P., Norman R., Rohm W., Huang C.-Y., Le Marshall J. Effects of Liquid Clouds on GPS Radio Occultation Profiles in Superrefractions // Earth and Space Science. 2019. V. 6. No. 8. P. 1498–1511. DOI: 10.1029/2019EA000721.
6. Winning Jr. T.E., Xie F., Nelson K.J. Assessing the Ducting Phenomenon and Its Potential Impact on Global Navigation Satellite System (GNSS) Radio Occultation Refractivity Retrievals over the Northeast Pacific Ocean Using Radiosondes and Global Reanalysis // Atmospheric Measurement Techniques. 2024. V. 17. No. 23. P. 6851–6863. DOI: 10.5194/amt-17-6851-2024.
7. Xie F., Syndergaard S., Kursinski E.R., Herman B. An Approach for Retrieving Marine Boundary Layer Refractivity from GPS Occultation Data in the Presence of Superrefraction // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2006. V. 23. No. 12. P. 1629–1644. DOI: 10.1175/JTECH1996.1.
8. Wang K.-N., De la Torre Juárez M., Ao C.O., Xie F. Correcting Negatively Biased Refractivity Below Ducts in GNSS Radio Occultation: An Optimal Estimation Approach Towards Improving Planetary Boundary Layer (PBL) Characterization // Atmospheric

Measurement Techniques. 2017. V. 10. No. 12. P 4761–4776. DOI: 10.5194/amt-10-4761-2017.

9. Wang K.-N., Ao C.O., De la Torre Juárez M. GNSS-RO Refractivity Bias Correction Under Ducting Layer Using Surface-Reflection Signal // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 3. Article 359. DOI: 10.3390/rs12030359.

10. Sokolovskiy S., Zeng Z., Hunt D.C., Weiss J.-P., Braun J.J., Schreiner W.S., Anthes R.A., et al. Detection of Superrefraction at the Top of the Atmospheric Boundary Layer from COSMIC-2 Radio Occultations // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2024. 41 (1): 65–78. DOI: 10.1175/jtech-d-22-0100.1.

11. Sokolovskiy S.V. Modeling and Inverting Radio Occultation Signals in the Moist Troposphere // Radio Science. 2001. V. 36. No. 3. P. 441–458. DOI: 10.1029/1999RS002273.

12. Gorbunov M.E., Lauritsen K.B. Analysis of Wave Fields by Fourier Integral Operators and Its Application for Radio Occultations // Radio Science. 2004. V. 39. No. 4. Article RS4010. DOI: 10.1029/2003RS002971.

13. Горбунов М.Е. Физические и математические принципы спутникового радиозатменного зондирования атмосферы Земли. – М.: ГЕОС, 2019. – 300 с. – ISBN 978-5-89118-780-1.

14. Jensen A.S., Lohmann M.S., Nielsen A.S., Benzon H.-H. Geometrical Optics Phase Matching of Radio Occultation Signals // Radio Science. 2004. V. 39. No. 3. Article RS3009. DOI: 10.1029/2003RS002899.

15. Syndergaard S. Modeling the Impact of the Earth's Oblateness on the Retrieval of Temperature and Pressure Profiles from Limb Sounding // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 1998. V. 60. No. 2. P. 171–80. DOI: 10.1016/S1364-6826(97)00056-4.

16. Gorbunov M.E., Lauritsen K.B., Leroy S.S. Application of Wigner Distribution Function for Analysis of Radio Occultations // Radio Science. 2010. V. 45. No. 6. Article RS6011. DOI: 10.1029/2010RS004388.

17. Xie F., Wu D.L., Ao C.O., Kursinski E.R., Mannucci A.J., Syndergaard S. Super-Refraction Effects on GPS Radio Occultation Refractivity in Marine Boundary Layers // Geophysical Research Letters. 2010. V. 37. No. 11. Article L11805. DOI: 10.1029/2010GL043299.

18. Sokolovskiy S., Zeng Z., Hunt D.C., Weiss J.-P., Braun J.J., Schreiner W.S., Anthes R.A., et al. Detection of Superrefraction at the Top of the Atmospheric Boundary Layer from COSMIC-2 Radio Occultations // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2024. 41 (1): 65–78. DOI: 10.1175/jtech-d-22-0100.1.

19. Sokolovskiy S.V., Rocken C., Lenschow D.H., Kuo Y.-H., Anthes R.A., Schreiner W.S., Hunt D.C. Observing the Moist Troposphere with Radio Occultation Signals from COSMIC // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. No. 18. Article L18802. DOI: 10.1029/2007GL030458.