

Метод канонических преобразований для обнаружения сверхрефракции

М. Е. Горбунов

*Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия
E-mail: gorbunov@ifaran.ru*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, Москва, 123242, Россия*

Явление сверхрефракции, или волноводного распространения, затрудняет интерпретацию радиозатменных наблюдений в нижней тропосфере, делая решение обратной задачи неединственным. В присутствии слоёв сверхрефракции применение стандартных алгоритмов обращения приводит к отрицательной систематической ошибке. Сверхрефракция чаще всего наблюдается в морском пограничном слое и других зонах, для которых характерна устойчивая слоисто-кучевая облачность. Мы предлагаем модификацию метода канонических преобразований для обнаружения сверхрефракции и определения параметров волновода по радиозатменным наблюдениям. Метод основан на применении интегрального оператора Фурье к выделенному фрагменту наблюдаемого волнового поля, соответствующему оценкам углов рефракции, превосходящим заданный порог. Это позволяет напрямую определить прицельную высоту луча, касающегося волновода. Для пересчёта прицельной высоты в геометрическую высоту перигея используется восстановленный профиль индекса рефракции. Метод также позволяет определить интенсивность и толщину волновода. Тестирование метода выполнено на данных спутника MetOp-B за январь 2025 г. Показано, что наиболее интенсивные волноводы образуют кластеры в основном в тропических зонах Атлантического, Тихого и Индийского океанов, а также над пустыней Сахара и других регионах. Волноводы над океанами в тропиках тоньше волноводов в средних широтах и над сушей.

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

Одобрена к печати: 10.03.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-3-74-87

Введение

Сверхрефракция, или волноводное распространение, возникает в присутствии сильных вертикальных градиентов индекса рефракции. Луч искривляется в направлении к оптически более плотной среде. Критическое значение градиента определяется условием равенства радиуса кривизны луча в точке перигея и её радиальной координаты. При достижении критической или большей величины градиента индекса рефракции луч будет захвачен. Это явление называется сверхрефракцией (Sokolovskiy, 2003). В радиозатменных экспериментах точка перигея луча, соединяющего передатчик и приёмник, может находиться только вне слоя сверхрефракции, или волновода. В этом случае решение обратной задачи восстановления индекса рефракции из радиозатменных наблюдений неединственно. Применение стандартных методов обращения приводит к отрицательной систематической ошибке (Sokolovskiy, 2003).

Наиболее значительные эффекты сверхрефракции и систематические ошибки восстановления индекса рефракции наблюдаются в морском пограничном слое (Feng et al., 2020; Hordyniec et al., 2019; Pham et al., 2024; Xie et al., 2010). В работе (Xie et al., 2010) 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. Для этих регионов характерна устойчивая слоисто-кучевая облачность; высокая частота возникновения сверхрефракции здесь подтверждается анализами Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды ECMWF (*англ.* European Centre for Medium-Range

Weather Forecasts) (von Engel, Teixeira, 2004). Это же показали наблюдения COSMIC (*англ.* Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate) за 2006–2013 гг. совместно с реанализом ERA-I (*англ.* ECMWF Re-Analysis I) (Feng et al., 2020) и данные COSMIC-2 за декабрь 2019–февраль 2020 г. совместно с реанализом ERA5 (*англ.* ECMWF Re-Analysis 5) (Pham et al., 2024). Систематические отрицательные ошибки растут в условиях облачного пограничного слоя, особенно над Тихим и Атлантическим океанами (Hordyniec et al., 2019).

Наблюдения тропосферных волноводов требуют измерения слабых сигналов ниже лимба планеты (Hordyniec et al., 2022; Sokolovskiy et al., 2014; Wu et al., 2022). Влияние сверхрефракции на структуру сигнала было исследовано в работе (Sokolovskiy et al., 2014). Было показано, что пучок лучей, захваченный волноводом с конечным горизонтальным размером, может быть заброшен существенно ниже лимба планеты. Дальнейшее изучение этого эффекта для морского пограничного слоя описано в исследовании (Wu et al., 2022), а для тропических циклонов — в публикации (Hordyniec et al., 2022).

В работах (Gorbunov, Dolovova, 2022; Gorbunov, Koval, 2021; Gorbunov et al., 2010) обсуждался время-частотный анализ на основе функций распределения Вигнера и Кирквуда. Он позволяет достичь высокого разрешения при визуализации слоёв сверхрефракции.

Влияние сверхрефракции на восстановление профилей метеопараметров нейтральной атмосферы рассматривалось в исследовании (Xu, Hong, 2019) с применением численного моделирования по замкнутой схеме. Использовались различные типы вертикальных профилей индекса рефракции: аналитическая модель, результаты обращения радиозатменных данных, а также ближайшие к точкам наблюдений профили из реанализов ECMWF. Для прямого моделирования применялся метод фазовых экранов (Gorbunov, Gurvich, 1998b), а при обращении использовался метод полного спектра (Jensen et al., 2003). Было показано, что ошибка восстановления индекса рефракции может достигать ~10 %.

Анализ влияния волноводного распространения на радиозатменные наблюдения, основанный на данных радиозондов высокого разрешения, был представлен в публикациях (Ao, 2007; Winning et al., 2024). Эти работы не учитывали горизонтальную неоднородность и использовали приближение геометрической оптики, что привело к переоценке эффекта сверхрефракции. Тем не менее можно согласиться с выводом, что отрицательная систематическая ошибка достигает наибольших значений ниже 2 км, с медианным значением около 0,5–1 % в тропиках и 0,2–0,5 % в средних широтах. Между 2 и 3 км систематическая ошибка в 2–3 раза меньше, а выше 4 км она пренебрежимо мала. В работе (Winning et al., 2024) выполнено сравнение эффектов сверхрефракции для данных радиозондов и ERA5 при помощи геометрооптического численного моделирования. Реанализ ERA5 занижает систематическую ошибку, тогда как данные радиозондов её завышают. Пиковое медианное значение систематической ошибки индекса рефракции N для радиозондов равно –5,42 %, а для ERA5 –2,96 %.

В публикациях (Wang et al., 2017, 2020; Xie et al., 2006) рассмотрены методы коррекции отрицательной систематической ошибки профилей индекса рефракции ниже волноводов. В работе (Xie et al., 2006) разработан метод идентификации решения, ближайшего к «истинному», с использованием физических ограничений, в частности величины прицельного параметра луча, касающегося поверхности Земли. К.-Н. Ван с соавторами (Wang et al., 2017) улучшили определение высоты волновода при помощи итерационного оптимального оценивания. В работе (Xie et al., 2006) в качестве ограничения использовалось давление водяного пара из вспомогательных данных. Ван с соавторами (Wang et al., 2020) предложили дальнейшее улучшение решения, пользуясь отражённым сигналом.

Радиоголографический метод обнаружения сверхрефракции был развит в исследовании (Sokolovskiy et al., 2024). Он основан на модели радиозатменного сигнала, использующей климатологию индекса рефракции и предсказывающей доплеровский сдвиг частоты с точностью 5–10 Гц (Sokolovskiy, 2001). Для понижения частоты измеренный комплексный сигнал делится на модель (опорный сигнал). Далее вычисляется спектр мощности сигнала с пониженной частотой во временном интервале, соответствующем высоте перигея прямых

лучей от -250 до -350 км. Сверхрефракция приводит к узкому пику спектра в районе 0 Гц. Отношение максимума спектра к оценке фонового шума является метрикой, позволяющей идентифицировать сверхрефракцию.

В настоящем исследовании мы опишем новый метод идентификации сверхрефракции на основе метода канонических преобразований (Gorbunov, Lauritsen, 2004a). Исходное комплексное поле как функция времени $u(t)$ преобразуется в представление прицельного параметра $\hat{u}(p)$. Такое преобразование реализуют интегральные операторы Фурье. Наш подход использует предварительную фильтрацию во временном представлении для выделения фрагмента записи, соответствующего углам рефракции, превосходящим заданный порог. Это аналогично выделению интервала высоты перигея прямых лучей в работе (Sokolovskiy et al., 2024). Отфильтрованный сигнал преобразуется в представление прицельного параметра. Максимум амплитуды поля в представлении прицельного параметра $|\hat{u}(p)|$ расположен в районе волновода. Это позволяет оценивать его интенсивность, высоту и толщину.

Материалы и методы

Методы волновой оптики и частотно-временной анализ при обработке радиозатменных наблюдений

На *рис. 1* показана геометрия радиозатменного зондирования в присутствии атмосферного волновода. Прицельный параметр луча p определяется как прицельная высота по отношению к центру Земли. Угол рефракции ϵ равен углу между начальным и конечным направлением луча. Знание профиля $\epsilon(p)$ позволяет восстанавливать профиль атмосферного индекса рефракции (Горбунов, 2019). На графиках удобно пользоваться прицельной высотой над лимбом планеты $\bar{p} = p - R_E$, где R_E — локальный радиус кривизны сечения стандартного эллипсоида плоскостью радиозахода (Syndergaard, 1998). Пик профиля угла рефракции $\epsilon(p)$ при перигее лучей около границы волновода приводит к тому, что при измерениях волнового поля на низкоорбитальном спутнике наблюдается многолучевое распространение. Это схематически проиллюстрировано на *рис. 1*: в интервале времени Δt интерферируют лучи из интервалов прицельного параметра Δp_{1-3} .

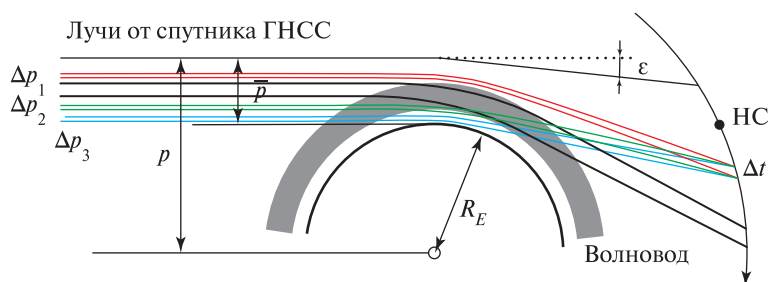


Рис. 1. Геометрия радиозатменного зондирования. Радиолучи от спутника Глобальной системы спутниковой навигации (ГНСС) преломляются земной атмосферой и принимаются на низкоорбитальном спутнике (НС)

Для определения профиля $\epsilon(p)$ в условиях многолучевого распространения используются методы волновой оптики (Горбунов, 2019). Эти методы берут начало от френелевской инверсии (Mortensen, Нюег, 1998; Mortensen et al., 1999), основанной на приближении фазового экрана. Метод обратного распространения (Gorbunov, Gurvich, 1998a, b) был разработан для обработки наблюдений в тропосфере, где применимость френелевской инверсии ограничена. Обратное распространение обеспечивало хорошую точность для простых каустических структур, однако не было универсальным решением. Метод канонических преобразований (Gorbunov, 2002) включал обратное распространение во вспомогательную плоскость в каче-

стве предварительной стадии, за которой следовало применение интегрального оператора Фурье, преобразовывавшего поле в представление прицельного параметра. Использование промежуточной вертикальной плоскости упрощало форму интегрального оператора Фурье. Этот метод был универсальным, однако его недостатком стала необходимость вычисления большого количества френелевских интегралов для обратного распространения. В работах (Jensen et al., 2002, 2003) была применена сферическая геометрия вместо вертикальной, что позволило прийти к другому типу простого приближенного решения, методу полного спектра. Синтез этих подходов впервые обсуждался в публикации (Gorbunov, Lauritsen, 2004b). В работе (Jensen et al., 2004) было найдено общее решение, метод наложения фазы. М. Е. Горбунов и К. Б. Лауритсен (Gorbunov, Lauritsen, 2004a) рассмотрели указанные методы как реализации или приближения общего интегрального оператора Фурье, преобразующего волновое поле в представление прицельного параметра. Ими же было введено представление приближённого прицельного параметра, допускающее быструю численную реализацию. В работе (Gorbunov et al., 2021) этот подход был обобщён на случай ненулевых горизонтальных градиентов, возмущающих прицельный параметр (Gorbunov, Kornbluh, 2001).

Интегральный оператор Фурье 2-го типа, преобразующий осциллирующее волновое поле в представление прицельного параметра, имеет следующую форму (Горбунов, 2019; Gorbunov, Lauritsen, 2004a; Jensen et al., 2004):

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

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, 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 $\varepsilon(p)$ связан с производной фазы преобразованного поля $\tilde{u}(p)$.

Обозначим через $t_s(p)$ время приёма луча с прицельной высотой p . В момент времени t к приёмнику приходят, вообще говоря, несколько лучей с прицельными высотами p_i , удовлетворяющими условию $t_s(p) = t$. Функции $|u(t)|^2$ и $|\tilde{u}(p)|^2$ — плотность энергии в представлениях времени и прицельного параметра соответственно, а преобразование $\hat{\Phi}_2$ перераспределяет энергию между ними. В силу сохранения энергии (Gorbunov, Lauritsen, 2004a)

$$|u(t)|^2 dt = \sum_i |\tilde{u}(p_i)|^2 dp_i = \sum_i |\tilde{u}(p_i)|^2 \left| \frac{dt_s(p_i)}{dp} \right|^{-1} dp.$$

Эта ситуация проиллюстрирована на *рис. 1* для конечных интервалов $\Delta t, \Delta p_i$.

Пример обработки радиозатменных наблюдений показан на *рис. 2* (см. с. 78). На левой панели представлена исходная амплитуда $|u(t_0(\bar{p}))|$ с приближённой привязкой к прицельной высоте посредством оценки $t_0(\bar{p}) \approx t_s(\bar{p})$ времени приёма луча с прицельной высотой $\bar{p}$. Оценка основана на модели фазовой задержки (Sokolovskiy, 2001; Sokolovskiy et al., 2024). На правой панели показана амплитуда преобразованного поля $\tilde{u}(\bar{p})$. В идеальном случае атмосферы без поглощения и горизонтальных градиентов зависимость $\tilde{u}(\bar{p})$ близка к θ -функции (Jensen et al., 2004). В данном примере сильные эффекты многолучёвости в интервале прицельной высоты $\bar{p} \in [2-4]$ км проявляются в сильных флуктуациях наблюдаемой амплитуды $|u(t_0(\bar{p}))|$. Относительные флуктуации амплитуды преобразованного поля $\tilde{u}(\bar{p})$ заметно слабее. Они объясняются как горизонтальными градиентами индекса рефракции, так и увеличением относительной величины шума при измерении слабого сигнала на пике профиля $\varepsilon(p)$. 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.

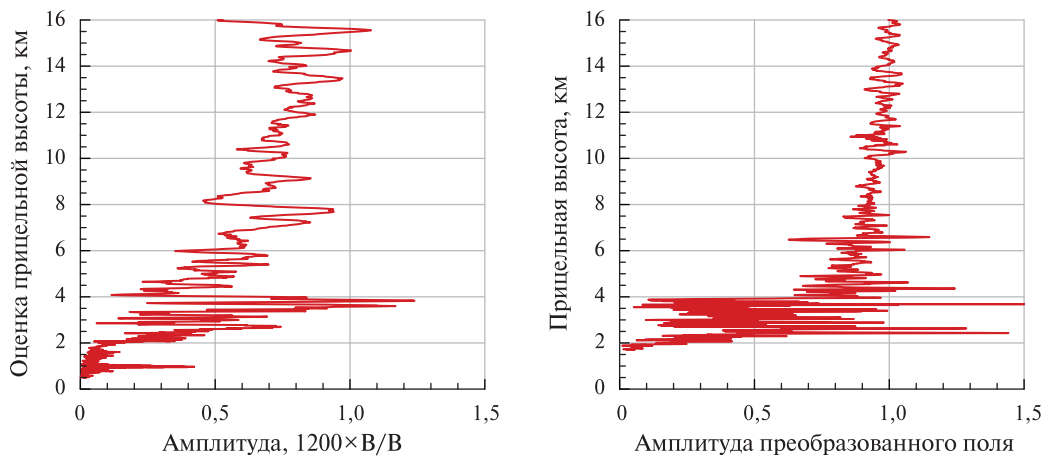


Рис. 2. Сеанс наблюдений COSMIC-2, 15.05.2020, 00:59 UTC (англ. Coordinated Universal Time), 15,51° ю. ш., 115,40° з. д. Исходная амплитуда $|u(t_0(\bar{p}))|$ с приближенной привязкой к прицельной высоте (слева). Амплитуда преобразованного поля $|\tilde{u}(\bar{p})|$ как функция прицельной высоты (справа)

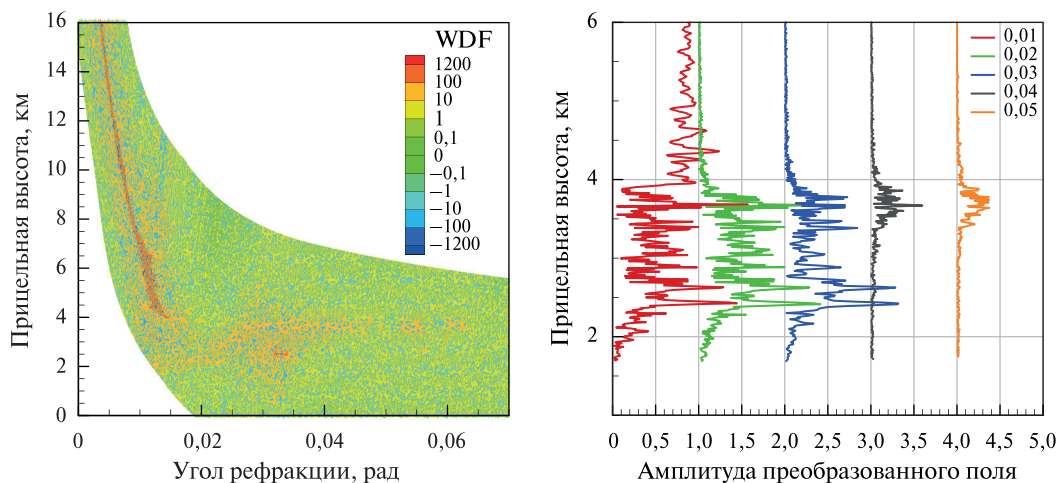


Рис. 3. Сеанс наблюдений COSMIC-2, 15.05.2020, 00:59 UTC, 15,51° ю. ш., 115,40° з. д. Функция Вигнера WDF в координатах угол рефракции — прицельная высота (слева). Амплитуда поля в представлении прицельного параметра как функция предельного угла рефракции (справа). Кривые для разных предельных углов рефракции последовательно сдвинуты на 1

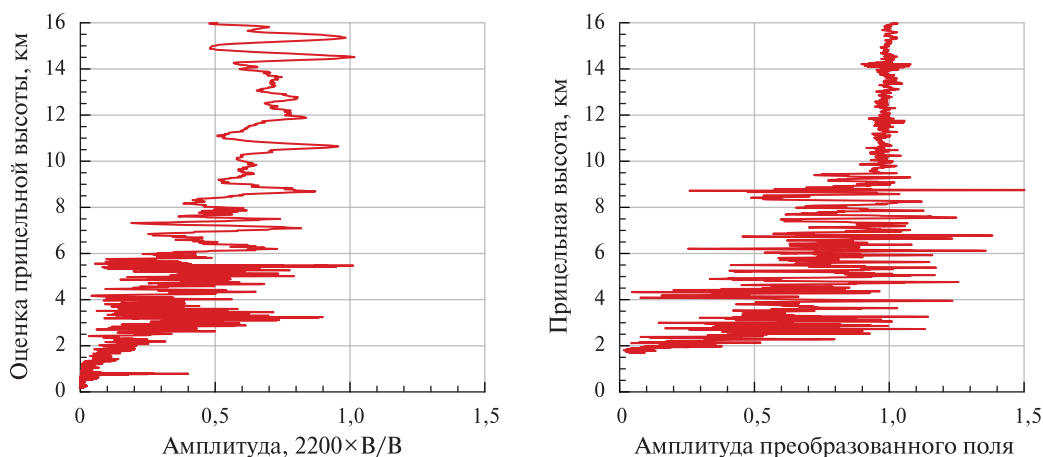


Рис. 4. Сеанс наблюдений COSMIC-2, 15.05.2020, 02:20 UTC, 20,37° ю. ш., 170,28° в. д. Исходная амплитуда $|u(t_0(\bar{p}))|$ с приближенной привязкой к прицельной высоте (слева). Амплитуда преобразованного поля $|\tilde{u}(\bar{p})|$ как функция прицельной высоты (справа)

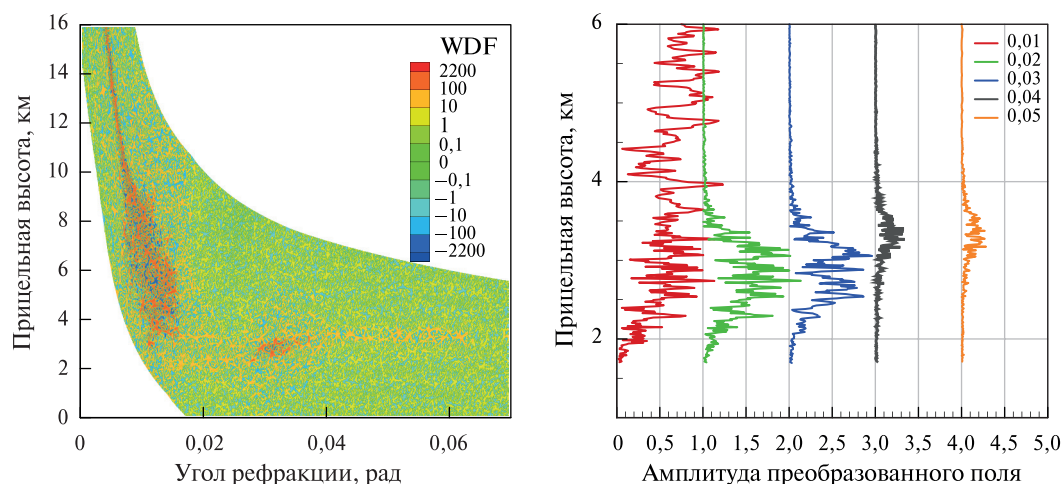


Рис. 5. Сеанс наблюдений COSMIC-2, 15.05.2020, 02:20 UTC, 20,37° ю. ш., 170,28° в. д. Функция Вигнера WDF в координатах угол рефракции – прицельная высота (слева). Амплитуда поля в представлении прицельного параметра как функция предельного угла рефракции (справа). Кривые для разных предельных углов рефракции последовательно сдвинуты на 1

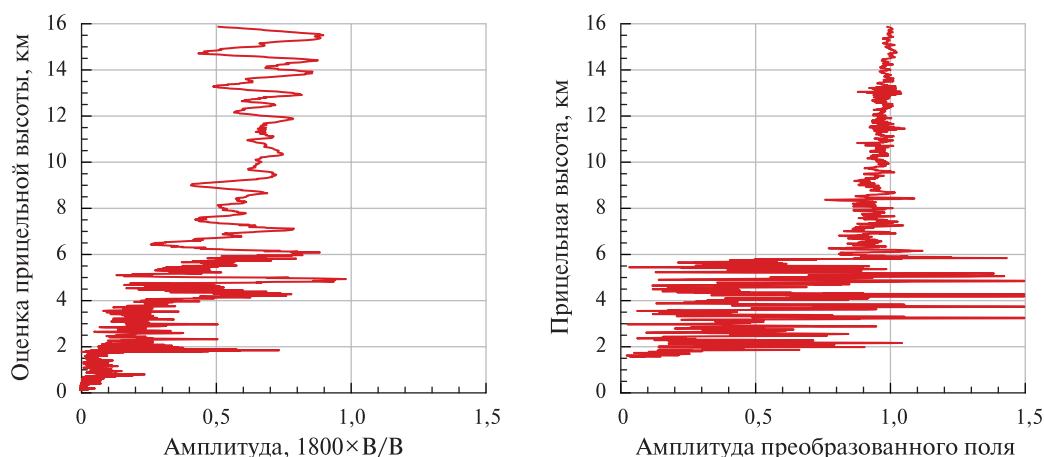


Рис. 6. Сеанс наблюдений COSMIC-2, 15.05.2020, 05:02 UTC, 17,36° с. ш., 27,25° з. д. Исходная амплитуда $|u(t_0(\bar{p}))|$ с приближенной привязкой к прицельной высоте (слева). Амплитуда преобразованного поля $|\tilde{u}(\bar{p})|$ как функция прицельной высоты (справа)

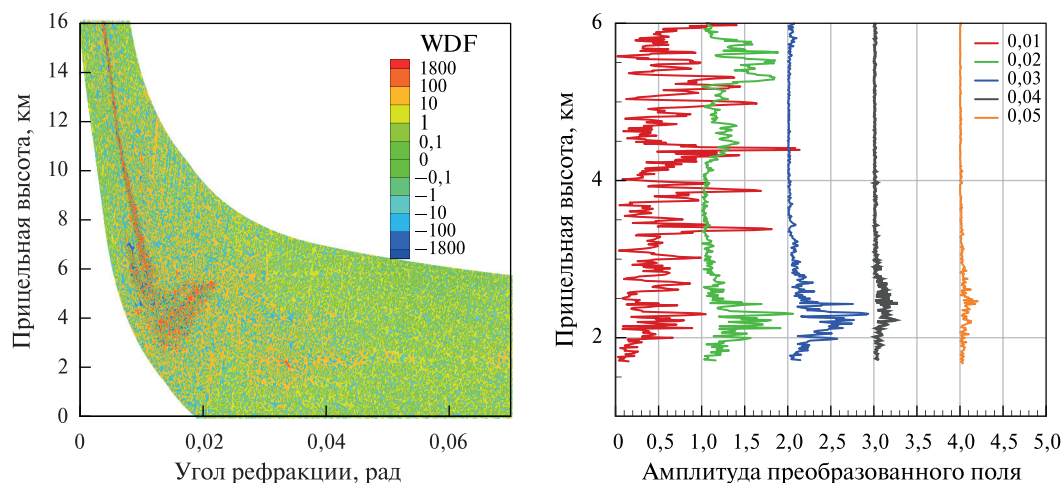


Рис. 7. Сеанс наблюдений COSMIC-2, 15.05.2020, 05:02 UTC, 17,36° с. ш., 27,25° з. д. Функция Вигнера WDF в координатах угол рефракции – прицельная высота (слева). Амплитуда поля в представлении прицельного параметра как функция предельного угла рефракции (справа). Кривые для разных предельных углов рефракции последовательно сдвинуты на 1

Более глубокое понимание структуры радиозатменного сигнала даёт частотно-временной анализ, основанный на функции Вигнера, в английской литературе называемой WDF (англ. Wigner Distribution Function) (Gorbunov et al., 2010), как показано на *рис. 3* (см. с. 78). Ниже 4 км наблюдается сильный пик угла рефракции величиной 0,064, вызванный сверхрефракцией.

Рисунки 4 и 5 (см. с. 78) показывают сеанс радиозатменных наблюдений, где многолучевое распространение наблюдается ниже 9,5 км, а пик сверхрефракции расположен около прицельной высоты 3 км.

На *рис. 6 и 7* (см. с. 79) приведён интересный пример с зоной интенсивного многолучевого распространения между 3 и 5,5 км и двумя пиками сверхрефракции: одним около 4 км и другим, более интенсивным, достигающим 0,07 рад, около 2 км.

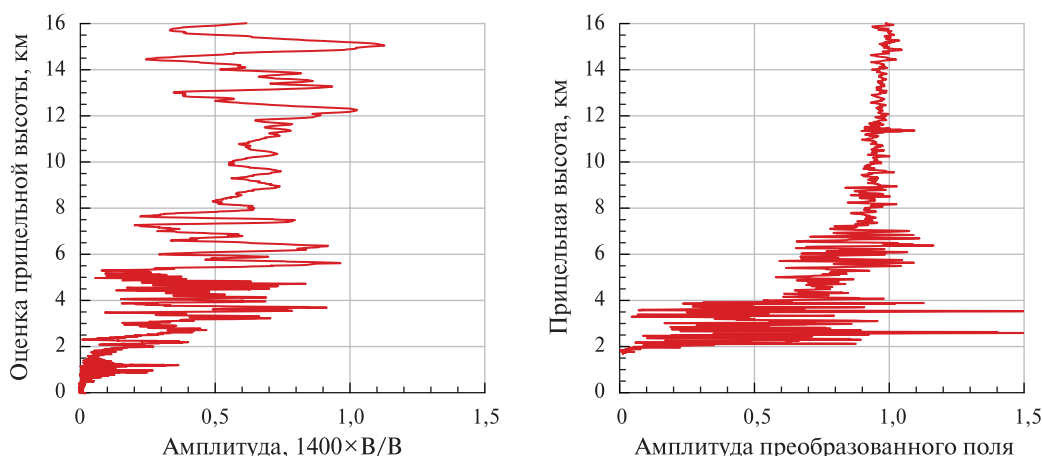


Рис. 8. Сеанс наблюдений COSMIC-2, 15.05.2020, 02:54 UTC, 17,31° ю. ш., 0,73° в. д. Исходная амплитуда $|u(t_0(\bar{p}))|$ с приближенной привязкой к прицельной высоте (*слева*). Амплитуда преобразованного поля $|\tilde{u}(\bar{p})|$ как функция прицельной высоты (*справа*)

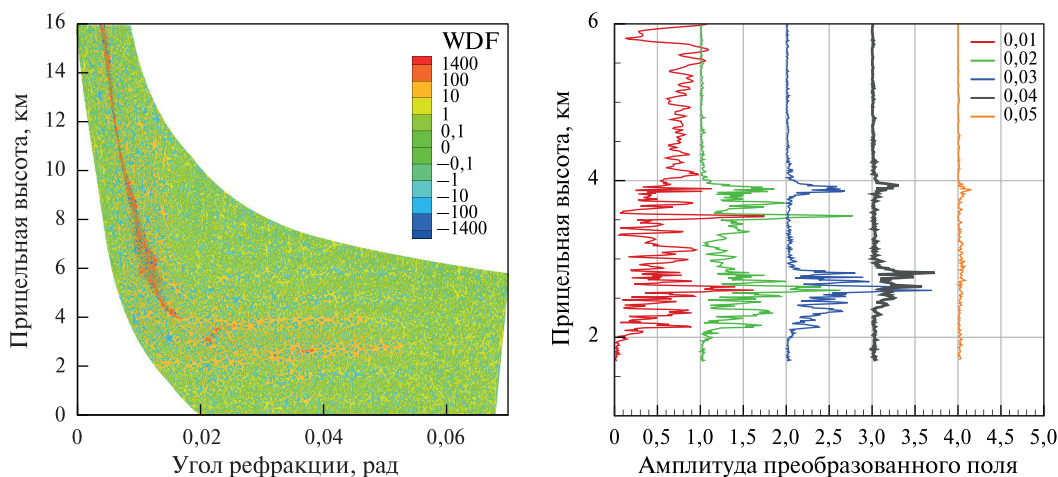


Рис. 9. Сеанс наблюдений COSMIC-2, 15.05.2020, 02:54 UTC, 17,31° ю. ш., 0,73° в. д. Функция Вигнера в координатах угол рефракции – прицельная высота (*слева*). Амплитуда фильтрованного поля в представлении прицельного параметра как функция предельного угла рефракции (*справа*). Кривые для разных предельных углов рефракции последовательно сдвинуты на 1

На *рис. 8 и 9* показан ещё один пример с двумя пиками сверхрефракции близкой интенсивности: около 4 км и около 2,5 км.

Метод канонических преобразований для обнаружения сверхрефракции

Рассмотрим модификацию метода канонических преобразований для обнаружения сверхрефракции. Вычислим сильно сглаженный профиль угла рефракции в геометрооптическом приближении (Gorbunov, Sokolovskiy, 1993; Gorbunov et al., 1996) $\varepsilon_{GO}(p)$, представленный в параметрической форме $\varepsilon_{GO}(t), p_{GO}(t)$.

Преобразуем фрагмент записи волнового поля $u(t)$ для интервала времени, соответствующего углам рефракции $\varepsilon_{GO}(p)$, превосходящим порог ε_{SR} , в представление прицельного параметра. Для этого мы модифицируем оператор (1) следующим образом:

$$\tilde{u}_{SR}(p) = \alpha \sqrt{\frac{-ik}{2\pi}} \int_{\varepsilon_{GO}(t) > \varepsilon_{SR}} a_2(p, t) \exp(ikS_2(p, t)) u(t) dt, \quad \alpha = \left[\frac{1}{p_{\min} - p_{\max}} \int_{p_{\min}}^{p_{\max}} |\tilde{u}(p')|^2 dp' \right]^{-1/2}.$$

Здесь α — нормировочная константа, равная среднеквадратичной величине $\tilde{u}(p)$ в световой зоне $p \in [p_{\min}, p_{\max}]$.

Если для всех моментов времени $\varepsilon_{GO}(t) < \varepsilon_{SR}$, то будем считать, что сверхрефракция не наблюдается. В противном случае мы вычисляем нормализованное поле в представлении прицельного параметра $\tilde{u}_{SR}(p)$ и анализируем его амплитуду $|\tilde{u}_{SR}(p)|$. В предположении, что имеется единичный пик, мы находим его интенсивность $I_{SR} = \max |\tilde{u}_{SR}(p)|$, его прицельную высоту $p_{SR} - R_E$ по отношению к радиусу локальной кривизны R_E Земли и его ширину Δp_{SR} . Эти три параметра характеризуют волновод.

Для вычисления геометрической высоты z_{SR} волновода мы используем восстановленный профиль индекса рефракции $n(z)$ и численно находим решение уравнения:

$$n(z_{SR}) \cdot (R_E + z_{SR}) = p_{SR}.$$

Оптимальное значение ε_{SR} выбирается так, чтобы оно превышало значения, характерные для регулярного профиля рефракции. С другой стороны, чем больше эта величина, тем больше событий будет отсеяно. На *рис. 3 (справа)* показан пример сеанса наблюдений COSMIC-2. Мы вычисляем амплитуду преобразованного поля $|\tilde{u}_{SR}(p)|$ для различных значений порога отсечки угла рефракции ε_{SR} . Сравнение с *рис. 3 (слева)* показывает, что $\varepsilon_{SR} = 0,04$ близко к оптимальной величине. Так, при $\varepsilon_{SR} = 0,03$ профиль $|\tilde{u}_{SR}(p)|$ помимо узкого пика, соответствующего сверхрефракции, содержит тропосферные структуры с более крупными масштабами. Аналогичный пример показан на *рис. 5*. В примерах, приведённых на *рис. 7 и 9*, можно было бы пользоваться значением $\varepsilon_{SR} = 0,03$. Однако величина 0,04 является универсальным значением. Это подтверждается и анализом большого массива радиозатменных наблюдений.

Результаты

На *рис. 10–12* (см. с. 82) показано распределение сверхрефракции по данным спутника MetOp-B (*англ.* Meteorological Operational satellite B) для января 2025 г. Был выбран MetOp-B, поскольку его наблюдения распределены по всем широтам, в отличие от наблюдений COSMIC-2, ограниченных полосой 45° ю.ш. — 45° с.ш. Выбранный месяц включает около 17 000 сеансов. Показано распределение трёх параметров: интенсивность, высота и толщина волновода.

Кластеры волноводов с высокой интенсивностью на *рис. 10* согласуются с работами (Sokolovskiy et al., 2024; Xie et al., 2010). Как показано на *рис. 11*, для океанов в тропиках характерна толщина волноводов 0,5–1 км. Для океанов в средних широтах волноводы толще, 1–2 км.

Рисунок 12 согласуется с выводом, что высота волноводов очень изменчива, следующим из статистического анализа большого объёма наблюдений (Sokolovskiy et al., 2024). Метод

канонических преобразований напрямую даёт прицельную высоту волновода, в отличие от оценки, основанной на вариации угла рефракции (Sokolovskiy et al., 2007, 2024), требующей подбора параметров.

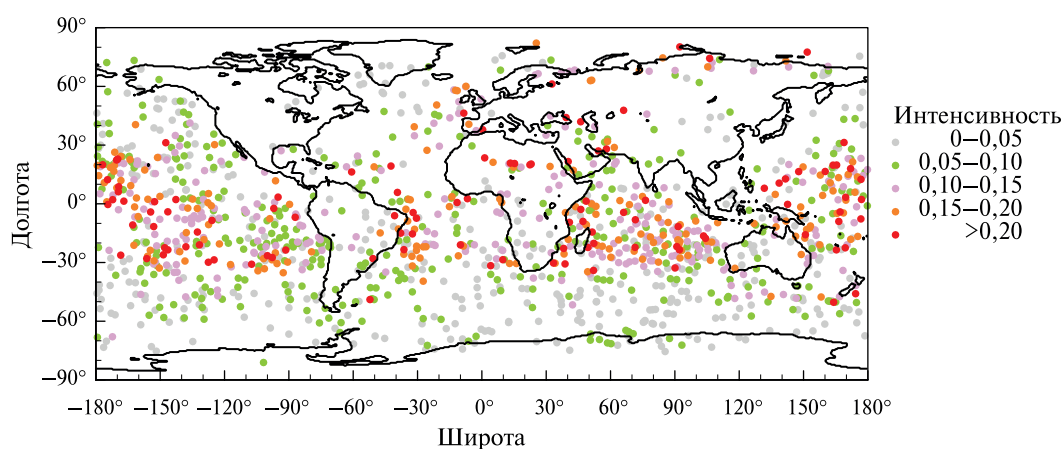


Рис. 10. Распределение интенсивности волноводов по данным MetOp-B, январь 2025 г. Значения цвета точек указаны в легенде

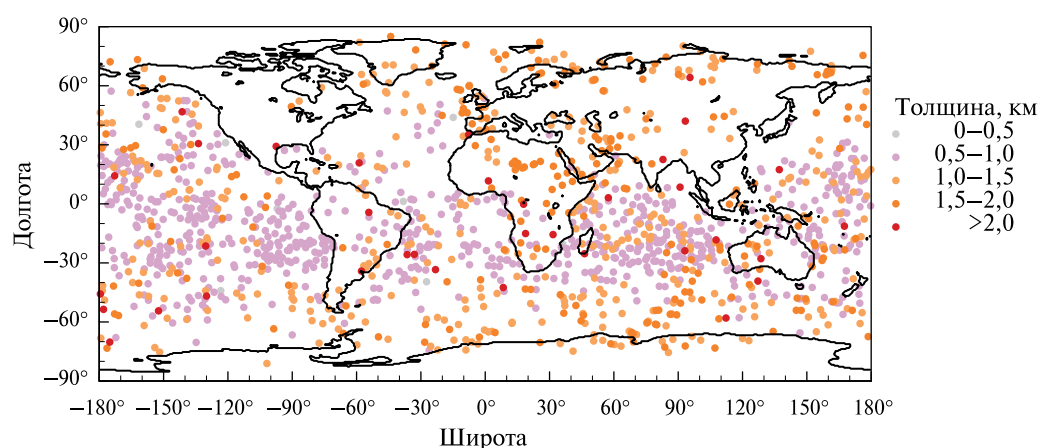


Рис. 11. Распределение толщины волноводов по данным MetOp-B, январь 2025 г. Значения цвета точек указаны в легенде

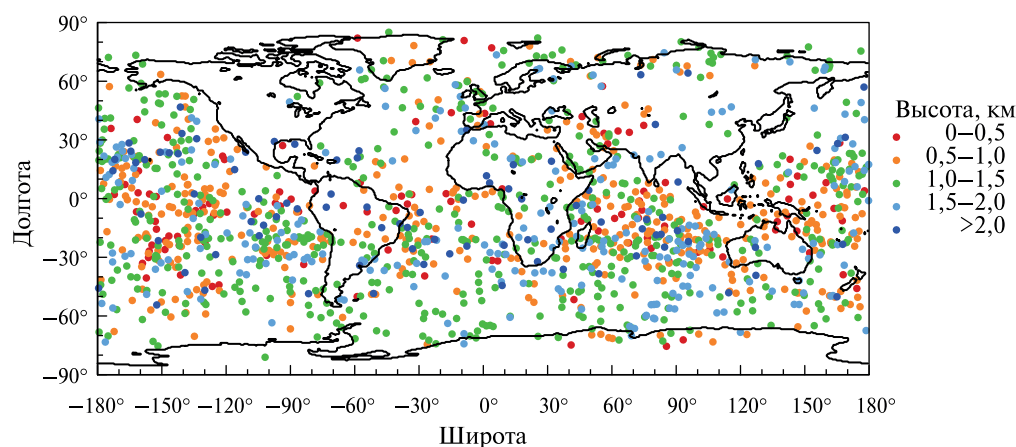


Рис. 12. Распределение высоты волноводов по данным MetOp-B, январь 2025 г. Значения цвета точек указаны в легенде

Обсуждение и заключение

А. С. Йенсен с соавторами (Jensen et al., 2004) ввели термин «наложение фазы», поскольку ядро интегрального оператора Фурье является радиоголографическим опорным сигналом. Это указывает на связь между методом канонических преобразований и спектрограммой. Однако метод канонических преобразований обеспечивает более точный выбор опорного сигнала. Наш метод, будучи модификацией метода канонических преобразований, обеспечивает преобразование волнового поля в представление прицельного параметра. Это позволяет напрямую получать прицельную высоту волновода. С другой стороны, как и спектрограмма (Sokolovskiy et al., 2024), наш метод основан на фильтрации поля в исходном (временном) представлении: из поля вырезается фрагмент, соответствующий сильной рефракции. Амплитуда преобразованного поля является более точной версией спектральной амплитуды. Методы канонических преобразований, полного спектра и наложения фазы следует считать разными приближениями одного и того же интегрального оператора Фурье (Gorbunov, Lauritsen, 2004a). Предложенный нами метод идентификации сверхрефракции может быть основан на любом из них. Метод можно реализовать, модифицируя существующий программный код, реализующий обработки радиозатменных данных на основе волновой оптики.

Метод обеспечивает метрику (интенсивность волновода) в интервале от 0 до 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.

Детальную статистику сверхрефракции можно найти в цитированной литературе. Наш анализ, основанный на одном месяце наблюдений MetOp-B, включающем около 17 000 сеансов, достаточен для валидации метода. Результаты нашего метода согласуются с результатами других авторов. Исследование связи между тремя параметрами волновода и моделями профиля индекса рефракции станет направлением для будущей работы.

Разделы «Введение» и «Материалы и методы» работы выполнены при финансовой поддержке государственного задания Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (FMWR-2025-0002, рег. карта 125020601652-8). Разделы «Результаты» и «Обсуждение и заключение» подготовлены при поддержке государственного задания Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (тема 17.1).

Литература

1. Горбунов М. Е. Физические и математические принципы спутникового радиозатменного зондирования атмосферы Земли. М.: ГЕОС, 2019. 300 с.
2. Ao C. O. Effect of ducting on radio occultation measurements: An assessment based on high-resolution radiosonde soundings // *Radio Science*. 2007. V. 42. No. 2. Article RS2008. DOI: 10.1029/2006RS003485.
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 // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2020. V. 37. No. 6. P. 1013–1025. DOI: 10.1175/JTECH-D-19-0206.1.
4. Gorbunov M. E. Canonical transform method for processing radio occultation data in the lower troposphere // *Radio Science*. 2002. V. 37. No. 5. Article 1076. DOI: 10.1029/2000RS002592.
5. Gorbunov M., Dolovova O. Fractional Fourier transform and distributions in the ray space: Application for the analysis of radio occultation data // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. No. 22. Article 5802. DOI: 10.3390/rs14225802.
6. Gorbunov M. E., Gurvich A. S. (1998a) Algorithms of inversion of Microlab-1 satellite data including effects of multipath propagation // *Intern. J. Remote Sensing*. 1998. V. 19. No. 12. P. 2283–2300. DOI: 10.1080/014311698214721.
7. Gorbunov M. E., Gurvich A. S. (1998b) Microlab-1 experiment: Multipath effects in the lower troposphere // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 1998. V. 103. No. D12. P. 13819–13826. DOI: 10.1029/98JD00806.

8. *Gorbunov M. E., Kornblueh L.* Analysis and validation of GPS/MET radio occultation data // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2001. V. 106. No. D15. P. 17161–17169. DOI: 10.1029/2000JD900816.
9. *Gorbunov M. E., Koval O. A.* Kirkwood and Wigner quantum densities, their properties, and applications in radiophysics // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2021. V. 64. No. 2. P. 140–148. DOI: 10.1007/s11141-021-10118-3.
10. *Gorbunov M. E., Lauritsen K. B.* (2004a) 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.
11. *Gorbunov M. E., Lauritsen K. B.* (2004b) Canonical transform methods for radio occultation data // *Occultations for probing atmosphere and climate* / eds. G. Kirchengast, U. Foelsche, A. K. Steiner. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. P. 61–68. DOI: 10.1007/978-3-662-09041-1_6.
12. *Gorbunov M. E., Sokolovskiy S. V.* Remote sensing of refractivity from space for global observations of atmospheric parameters: Report 119. Hamburg: Max-Planck Institute for Meteorology, 1993.
13. *Gorbunov M. E., Sokolovskiy S. V., Bengtsson L.* Space refractive tomography of the atmosphere: modeling of direct and inverse problems: Report No. 210. Hamburg: Max-Planck Institute for Meteorology, 1996.
14. *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.
15. *Gorbunov M., Kirchengast G., Lauritsen K. B.* Generalized canonical transform method for radio occultation sounding with improved retrieval in the presence of horizontal gradients // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2021. V. 14. No. 2. P. 853–867. DOI: 10.5194/amt-14-853-2021.
16. *Hordyniec P., Norman R., Rohm W. et al.* Effects of liquid clouds on GPS radio occultation profiles in super-refractions // *Earth and Space Science*. 2019. V. 6. No. 8. P. 1498–1511. DOI: 10.1029/2019EA000721.
17. *Hordyniec P., Kuleshov Y., Choy S., Norman R.* Observation of deep occultation signals in tropical cyclones with COSMIC-2 measurements // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2022. V. 19. Article 1002905. 5 p. DOI: 10.1109/LGRS.2021.3092511.
18. *Jensen A. S., Benzon H.-H., Lohmann M. S.* A new high resolution method for processing radio occultation data: Scientific report 02-06. Copenhagen, Denmark: Danish Meteorological Institute, 2002. 15 p.
19. *Jensen A. S., Lohmann M. S., Benzon H.-H., Nielsen A. S.* Full Spectrum Inversion of radio occultation signals // *Radio Science*. 2003. V. 38. No. 3. Article 1040. DOI: 10.1029/2002RS002763.
20. *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.
21. *Mortensen M. D., Hoeg P.* Inversion of GPS occultation measurements using Fresnel diffraction theory // *Geophysical Research Letters*. 1998. V. 25. No. 13. P. 2441–2444. DOI: 10.1029/98GL51838.
22. *Mortensen M. D., Linfield R. P., Kursinski E. R.* Vertical resolution approaching 100m for GPS occultations of the Earth's atmosphere // *Radio Science*. 1999. V. 34. No. 6. P. 1475–1484. DOI: 10.1029/1999RS900093.
23. *Pham G. H., Yang S.-C., Chang C.-C. et al.* 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.
24. *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.
25. *Sokolovskiy S.* Effect of superrefraction on inversions of radio occultation signals in the lower troposphere // *Radio Science*. 2003. V. 38. No. 3. Article 1058. DOI: 10.1029/2002RS002728.
26. *Sokolovskiy S. V., Rocken C., Lenschow D. H. et al.* Observing the moist troposphere with radio occultation signals from COSMIC // *Geophysical Research Letters*. 2007. V. 34. No. 18. Article L18802. DOI: 10.1029/2007GL030458.
27. *Sokolovskiy S., Schreiner W., Zeng Z. et al.* Observation, analysis, and modeling of deep radio occultation signals: Effects of tropospheric ducts and interfering signals // *Radio Science*. 2014. V. 49. No. 10. P. 954–970. DOI: 10.1002/2014RS005436.
28. *Sokolovskiy S., Zeng Z., Hunt D. C. et al.* Detection of superrefraction at the top of the atmospheric boundary layer from COSMIC-2 radio occultations // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2024. V. 41. No. 1. P. 65–78. DOI: 10.1175/jtech-d-22-0100.1.
29. *Syndergaard S.* Modeling the impact of the Earth's oblateness on the retrieval of temperature and pressure profiles from limb sounding // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 1998. V. 60. No. 2. P. 171–180. DOI: 10.1016/S1364-6826(97)00056-4.
30. *von Engel A., Teixeira J.* A ducting climatology derived from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts global analysis fields // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2004. V. 109. No. D18. Article D18104. DOI: 10.1029/2003jd004380.
31. *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.
32. 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.
 33. Winning T. E., Jr., 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.
 34. Wu D. L., Gong J., Ganeshan M. GNSS-RO deep refraction signals from moist marine atmospheric boundary layer (MABL) // *Atmosphere*. 2022. V. 13. No. 6. Article 953. DOI: 10.3390/atmos13060953.
 35. Xie F., Syndergaard S., Kursinski E. R., Herman B. M. An approach for retrieving marine boundary layer refractivity from GPS occultation data in the presence of superrefraction // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2006. V. 23. No. 12. P. 1629–1644. DOI: 10.1175/JTECH1996.1.
 36. Xie F., Wu D. L., Ao C. O. et al. 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.
 37. Xu X.-S., Hong Z.-J. Analysis of the influence of the superrefraction effect on the Earth's neutral atmospheric parameters retrieval // *China Satellite Navigation Conf. (CSNC) 2019: Proc.* V. 1. Singapore: Springer, 2019. P. 184–192. DOI: 10.1007/978-981-13-7751-8_19.

Canonical transform method for detection of superrefraction

M. E. Gorbunov

A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia
E-mail: gorbunov@ifaran.ru

Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation, Moscow 123242, Russia

The phenomenon of superrefraction, or ducting, strongly affects radio occultation observations in the lower troposphere, making the solution of the inverse problem non-unique. Application of the standard inversion algorithms, in presence of ducts, results in negative bias. Superrefraction is mostly observed in the marine boundary layer and other zones with typical persistent stratocumulus clouds. In this paper, we describe a modification of the canonical transform method for the detection of superrefraction from radio occultation observations and the determination of duct parameters. The method is based on application of the Fourier Integral Operator to the observed wave field filtered in the time domain. The filter is based on bending angle estimates exceeding a pre-specified threshold. An advantage of this method over the existing ones is that it allows for direct determination of the impact height of the duct. The impact height is transformed into the geometric altitude by using the retrieved refractivity profile. Two other parameters of the ducts are their strength and width. The method is validated by the analysis of MetOp-B data for January, 2025. We plot the three parameters of detected superrefraction events and demonstrate that the strongest events form clusters in the tropical zones of the Atlantic, Pacific, and Indian Oceans, as well as in the Sahara desert and some other regions. Another observation is that the ducts over oceans in tropics are generally thinner as compared to those in middle latitudes and over land.

Keywords: radio occultation, superrefraction, wave optics, canonical transform

Accepted: 10.03.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-3-74-87

References

1. Gorbunov M. E., *Fizicheskie i matematicheskie printsipy sputnikovogo radiozatsmennogo zondirovaniya atmosfery Zemli* (Physical and mathematical principles of satellite radio occultation sounding of the Earth's atmosphere), Moscow: GEOS, 2019, 300 p.
2. Ao C. O., Effect of ducting on radio occultation measurements: An assessment based on high-resolution radiosonde soundings, *Radio Science*, 2007, V. 42, No. 2, Article RS2008, DOI: 10.1029/2006RS003485.
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, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2020, V. 37, No. 6, pp. 1013–1025, DOI: 10.1175/JTECH-D-19-0206.1.
4. Gorbunov M. E., Canonical transform method for processing radio occultation data in the lower troposphere, *Radio Science*, 2002, V. 37, No. 5, Article 1076, DOI: 10.1029/2000RS002592.
5. Gorbunov M., Dolovova O., Fractional Fourier transform and distributions in the ray space: Application for the analysis of radio occultation data, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 22, Article 5802, DOI: 10.3390/rs14225802.
6. Gorbunov M. E., Gurvich A. S. (1998a), Algorithms of inversion of Microlab-1 satellite data including effects of multipath propagation, *Intern. J. Remote Sensing*, 1998, V. 19, No. 12, pp. 2283–2300, DOI: 10.1080/014311698214721.
7. Gorbunov M. E., Gurvich A. S. (1998b), Microlab-1 experiment: Multipath effects in the lower troposphere, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, V. 103, No. D12, pp. 13819–13826, DOI: 10.1029/98JD00806.
8. Gorbunov M. E., Kornblueh L., Analysis and validation of GPS/MET radio occultation data, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, V. 106, No. D15, pp. 17161–17169, DOI: 10.1029/2000JD900816.
9. Gorbunov M. E., Koval O. A., Kirkwood and Wigner quantum densities, their properties, and applications in radiophysics, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2021, V. 64, No. 2, pp. 140–148, DOI: 10.1007/s11141-021-10118-3.
10. Gorbunov M. E., Lauritsen K. B. (2004a), 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.
11. Gorbunov M. E., Lauritsen K. B. (2004b), Canonical transform methods for radio occultation data, In: *Occultations for probing atmosphere and climate*, G. Kirchengast, U. Foelsche, A. K. Steiner (eds.), Berlin, Heidelberg: Springer, 2004, pp. 61–68, DOI: 10.1007/978-3-662-09041-1_6.
12. Gorbunov M. E., Sokolovskiy S. V., *Remote sensing of refractivity from space for global observations of atmospheric parameters: Report 119*, Hamburg: Max-Planck Institute for Meteorology, 1993.
13. Gorbunov M. E., Sokolovskiy S. V., Bengtsson L., *Space refractive tomography of the atmosphere: modeling of direct and inverse problems: Report No. 210*, Hamburg: Max-Planck Institute for Meteorology, 1996.
14. 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.
15. Gorbunov M., Kirchengast G., Lauritsen K. B., Generalized canonical transform method for radio occultation sounding with improved retrieval in the presence of horizontal gradients, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, V. 14, No. 2, pp. 853–867, DOI: 10.5194/amt-14-853-2021.
16. Hordyniec P., Norman R., Rohm W. et al., Effects of liquid clouds on GPS radio occultation profiles in superrefractions, *Earth and Space Science*, 2019, V. 6, No. 8, pp. 1498–1511, DOI: 10.1029/2019EA000721.
17. Hordyniec P., Kuleshov Y., Choy S., Norman R., Observation of deep occultation signals in tropical cyclones with COSMIC-2 measurements, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, V. 19, Article 1002905, 5 p., DOI: 10.1109/LGRS.2021.3092511.
18. Jensen A. S., Benzon H.-H., Lohmann M. S., *A new high resolution method for processing radio occultation data: Scientific report 02-06*, Copenhagen, Denmark: Danish Meteorological Institute, 2002, 15 p.
19. Jensen A. S., Lohmann M. S., Benzon H.-H., Nielsen A. S., Full spectrum inversion of radio occultation signals, *Radio Science*, 2003, V. 38, No. 3, Article 1040, DOI: 10.1029/2002RS002763.
20. 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.
21. Mortensen M. D., Høeg P., Inversion of GPS occultation measurements using Fresnel diffraction theory, *Geophysical Research Letters*, 1998, V. 25, No. 13, pp. 2441–2444, DOI: 10.1029/98GL51838.
22. Mortensen M. D., Linfield R. P., Kursinski E. R., Vertical resolution approaching 100m for GPS occultations of the Earth's atmosphere, *Radio Science*, 1999, V. 34, No. 6, pp. 1475–1484, DOI: 10.1029/1999RS900093.
23. Pham G. H., Yang S.-C., Chang C.-C. et al., 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, pp. 3605–3623, DOI: 10.5194/amt-17-3605-2024.

24. Sokolovskiy S. V., Modeling and inverting radio occultation signals in the moist troposphere, *Radio Science*, 2001, V. 36, No. 3, pp. 441–458, DOI: 10.1029/1999RS002273.
25. Sokolovskiy S., Effect of superrefraction on inversions of radio occultation signals in the lower troposphere, *Radio Science*, 2003, V. 38, No. 3, Article 1058, DOI: 10.1029/2002RS002728.
26. Sokolovskiy S. V., Rocken C., Lenschow D. H. et al., Observing the moist troposphere with radio occultation signals from COSMIC, *Geophysical Research Letters*, 2007, V. 34, No. 18, Article L18802, DOI: 10.1029/2007GL030458.
27. Sokolovskiy S., Schreiner W., Zeng Z. et al., Observation, analysis, and modeling of deep radio occultation signals: Effects of tropospheric ducts and interfering signals, *Radio Science*, 2014, V. 49, No. 10, pp. 954–970, DOI: 10.1002/2014RS005436.
28. Sokolovskiy S., Zeng Z., Hunt D. C. et al., Detection of superrefraction at the top of the atmospheric boundary layer from COSMIC-2 radio occultations, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2024, V. 41, No. 1, pp. 65–78, DOI: 10.1175/jtech-d-22-0100.1.
29. Syndergaard S., Modeling the impact of the Earth's oblateness on the retrieval of temperature and pressure profiles from limb sounding, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1998, V. 60, No. 2, pp. 171–180, DOI: 10.1016/S1364-6826(97)00056-4.
30. von Engel A., Teixeira J., A ducting climatology derived from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts global analysis fields, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, V. 109, No. D18, Article D18104, DOI: 10.1029/2003jd004380.
31. 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, pp. 4761–4776, DOI: 10.5194/amt-10-4761-2017.
32. 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.
33. Winning T. E., Jr., 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, pp. 6851–6863, DOI: 10.5194/amt-17-6851-2024.
34. Wu D. L., Gong J., Ganeshan M., GNSS-RO deep refraction signals from moist marine atmospheric boundary layer (MABL), *Atmosphere*, 2022, V. 13, No. 6, Article 953, DOI: 10.3390/atmos13060953.
35. Xie F., Syndergaard S., Kursinski E. R., Herman B. M., An approach for retrieving marine boundary layer refractivity from GPS occultation data in the presence of superrefraction, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2006, V. 23, No. 12, pp. 1629–1644, DOI: 10.1175/JTECH1996.1.
36. Xie F., Wu D. L., Ao C. O. et al., 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.
37. Xu X.-S., Hong Z.-J., Analysis of the influence of the superrefraction effect on the Earth's neutral atmospheric parameters retrieval, In: *China Satellite Navigation Conf. (CSNC) 2019: Proc.*, V. 1, Singapore: Springer, 2019, pp. 184–192, DOI: 10.1007/978-981-13-7751-8_19.