

## **Определение сплоченности морского льда в Арктике на основе анализа радиозатменных данных эксперимента COSMIC-1/FORMOSAT-3**

А. В. Шмаков<sup>1</sup>, М. Е. Горбунов<sup>1,2</sup>, Ю.В. Киселева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН,  
119017, Москва, Пыжевский пер., 3  
E-mail: ldr@ifaran.ru

<sup>2</sup> ФГБУ «Гидрометцентр России»,  
123242, Москва, Б. Предтеченский пер., 11-13  
E mail: gorbunov@ifaran.ru

*Радиозатменное зондирование с использованием навигационных спутниковых систем получило широкое применение. Стандартные методы восстановления параметров ионосферы и нейтральной атмосферы Земли основаны на анализе прямых сигналов. Учет отраженных от Земли лучей позволяет получать характеристики поверхности. В работе используются данные эксперимента COSMIC-1/FORMOSAT-3 (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate / Formosa Satellite Mission). Для оценки интенсивности отражённого луча использован модернизированный метод канонических преобразований, основанный на использовании интегральных операторов Фурье, и позволяющий создавать эффективные численные алгоритмы. Чаще всего отраженные лучи наблюдаются над водной поверхностью океана и ледяными полями. В работе используется индекс отражения, который определяется как отношение амплитуды пика радиологического спектра, соответствующего отражённому сигналу, к амплитуде пика спектра, соответствующего прямому сигналу. Индекс отражения сравнивается с глобальным набором данных о ледовых полях ERA5, разработанного European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Copernicus Climate Change Service. Сравнение проводилось для наблюдений за несколько дней для каждого из сезонов 2008 года.*

*Ключевые слова:* радиозатменный метод, морской лед, Арктика

## **Determination of Arctic Sea ice concentration based on analysis of radio occultation data from the COSMIC-1/FORMOSAT-3 experiment**

A. V. Shmakov<sup>1</sup>, M. E. Gorbunov<sup>1,2</sup>, Yu. V. Kiseleva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics

<sup>2</sup> Hydrometeorological Research Center of Russian Federation

*Radio occultation sounding using navigation satellite systems is widely used. The standard methods of the retrieval of the parameters of the Earth's ionosphere and neutral atmosphere are based on the analysis of direct ray. Taking into account the rays reflected from the Earth makes it possible to obtain characteristics of the surface. This study utilizes data from the COSMIC-1/FORMOSAT-3 (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate / Formosa Satellite Mission) experiment. The reflected beam intensity is estimated using the modified canonical transform method based on Fourier integral operators, which enables the development of efficient numerical algorithms. Reflected beams are mostly observed over the water ocean surface and ice fields. The study utilizes the reflectivity index, which is defined as the ratio of the amplitude of the radiological spectrum peak corresponding to the reflected signal to the amplitude of the spectrum peak corresponding to the direct signal. The reflectivity index is compared with the ERA5 global ice field dataset developed by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Copernicus Climate Change Service. The comparison was conducted over several days for each of the 2008 seasons.*

*Keywords:* radio occultation method, sea ice, Arctic

## Введение

Радиозатменный метод основан на использовании прежде всего прямых сигналов навигационных спутников (ГНСС) для изучения ионосферы и нейтральной атмосферы Земли. Еще в 1990-х и начале 2000-х предлагалось использовать для изучения подстилающей поверхности отраженные от поверхности Земли сигналы. При этом приемники могут располагаться на Земле [1], самолёте [2] или спутнике [3]. Существование отраженного сигнала от земной поверхности в радиозатменных данных было обнаружено в самом начале 2000-ых годов [4,5,6] при помощи радиологического анализа.

Метод радиозатменного зондирования атмосферы Земли основан на том, что радиосигнал с навигационного спутника, прошедший через атмосферу Земли и принятый на низкоорбитальном спутнике, несет в себе информацию об распределении атмосферного показателя преломления. Простейший алгоритм основан на вычислении зависимости угла рефракции от прицельного параметра в геометрикооптическом приближении [7, 8].

Радиосигналы, распространяющиеся в нижних слоях тропосферы, могут иметь очень сложную структуру из-за эффектов многолучевого распространения и дифракции (рис. 1) [9,10,11]. Угол рефракции нельзя напрямую определить по фазе волнового поля в зонах многолучевого распространения, поскольку в каждой точке фаза определяется амплитудами и фазами нескольких интерферирующих лучей.

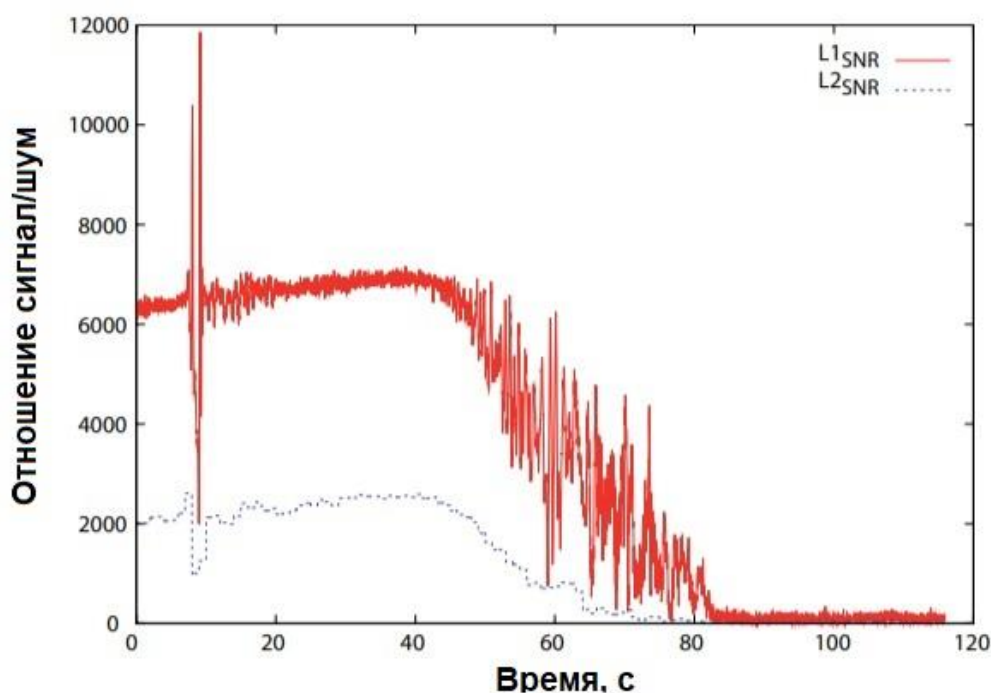


Рис. 1. Пример записи отношение сигнал/шум (SNR) одного из спутников GPS на каналах L1 и L2

Для решения этой проблемы были предложены два основных метода обработки радиозатменных сигналов в зонах многолучёвости: (1) метод обратного распространения [8,9,10,12] и (2) радиооптический метод [13,14,15].

В первом методе волновое поле, измеренное вдоль траектории принимающего сигнал спутника, используется в качестве граничного условия для решения уравнения Гельмгольца по обратному распространению поля в вакууме. В основе лучевой структуры полученного поля могут лежать два типа каустик: реальные и мнимые. Между

ними может находиться однолучевая область, в которой полученное поле обрабатывается стандартным способом. Однако положение однолучевой области неизвестно заранее, поскольку каустическая структура зависит от профиля угла рефракции, который еще предстоит определить. Было показано [16], что могут возникать сложные каустические структуры с перекрытием реальных и мнимых каустик, что приводит к сбоям в методе обратного распространения. Кроме этого, в реальной атмосфере присутствуют мелкомасштабные неоднородности, которые приводят к еще более сложным структурам волновых полей [17].

В радиооптическом методе используется анализ пространственных спектров волнового поля в малых скользящих апертурах. Лучи локально ассоциируются с плоскими волнами и визуализируются как максимумы локальных пространственных спектров. У этого метода есть следующие недостатки: (1) его нельзя применять в субкаустических зонах, где волновое поле нельзя интерпретировать с точки зрения лучей, и (2) он имеет ограниченное разрешение [16].

Эти проблемы решаются при помощи метода канонических преобразований [18, 19]. Этот метод основан на нахождении оптимальной однолучевой проекции лучевого многообразия при помощи преобразования поля в представление прицельного параметра. Это преобразование выполняется при помощи интегральных операторов Фурье. При помощи этого метода можно восстанавливать зависимость угла рефракции от прицельного параметра не только для прямых, но и для отраженных лучей [20]. Применение методов радиоголографической фильтрации позволяет выделить отраженный сигнал и оценить его относительную интенсивность. Эта величина называется индексом отражений.

Интенсивное отражения часто наблюдается для ледовых полей. В данной работе мы рассматриваем применение индекса для определения сплоченности арктического льда.

Статья организована следующим образом. В разделе 1 дано краткое описание восстановления отраженного луча из радиозатменных данных. В разделе 2 дано определение индекса отражения. В разделе 3 произведено сравнение значения индекса отражения с глобальными ледовыми полями ERA5. И в заключении предложено обсуждение полученных результатов и дальнейшей работы.

## **1. Восстановление отраженного луча от поверхности Земли**

В данной работе мы используем метод канонического преобразования для восстановления отраженного сигнала по данным радиозатменных наблюдений в нижних слоях тропосферы, который представляет из себя усовершенствованный метод обратного распространения [18,19,20]

Волновую задачу можно связать с канонической системой Гамильтона, которая описывает геометрическую оптическую лучевую структуру волнового поля [21,22]. Система Гамильтона записывается в терминах пространственных координат и импульса, связанного с направлением луча. Многолучевое распространение возникает в областях, где несколько точек этого многообразия имеют одинаковые пространственные координаты. Каноническое преобразование в фазовом пространстве позволяет ввести новые пространственные координаты и импульс таким образом, чтобы лучи имели уникальные пространственные координаты. Записывается интегральный оператор Фурье, связанный с этим каноническим преобразованием, который преобразует волновую функцию в новое представление уже с однолучевым распространением. Поле в преобразованном пространстве умножается на функцию фильтрации, которая подавляет прямой луч и пропускает только компоненты отраженного луча. Отфильтрованное поле отображается обратно во временную область и отраженные лучи восстанавливаются стандартным способом.

## 2. Радиоголографический индекс отражения

Интенсивность отраженного сигнала мала по сравнению с интенсивностью прямого, но радиоголографический анализ позволяет ввести величину, характеризующую их отношение. В [20] модель отраженного сигнала  $S_M(t)$  используется как опорный сигнал и радиоголографический спектр строится следующим образом:

$$U_R(\omega) = \int A(t) \exp(ik[S(t) - S_M(t)] - i\omega t) dt,$$

где  $A(t)$  и  $S(t)$  амплитуда и набег фазы наблюдаемого сигнала,  $\omega$  – частота и  $t$  – время. Каждая частота  $\omega$  может быть преобразована в соответствующий прицельный параметр  $p$ . Пример радиоголографического спектра приведен на рис.2, на котором хорошо виден отраженный луч в районе  $p = 0$ .

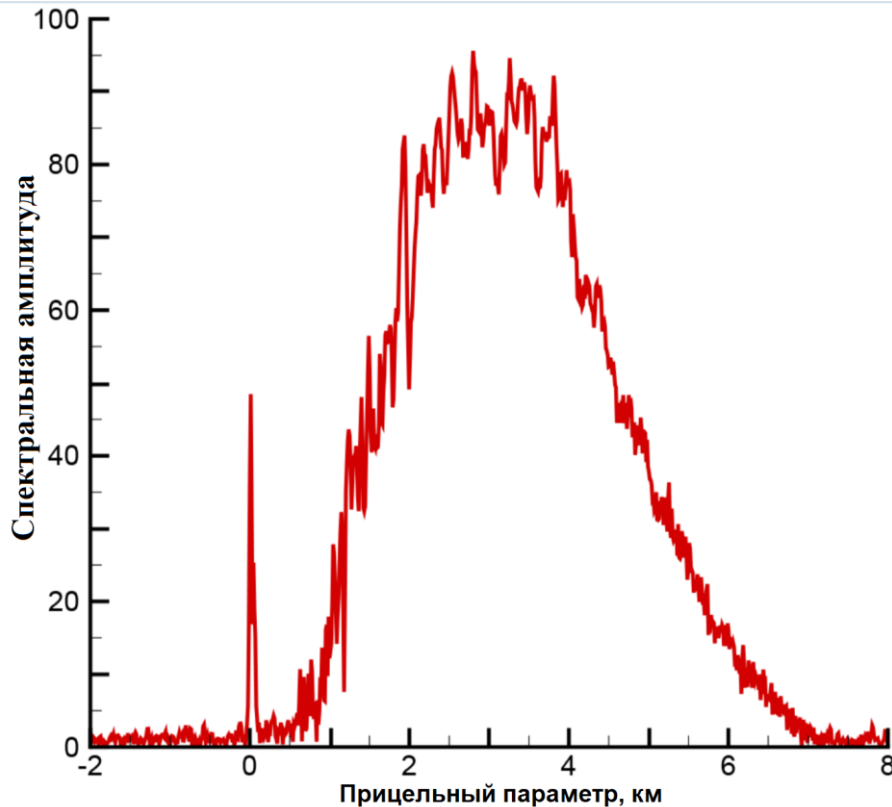


Рис2. Амплитуда радиоголографического спектра  $|U(p)|$  по радиозатменным данным от 01.01.2008.

Понятие индекса отражения вводится с использованием ряда эмпирических параметров:

$$U_{max} = \max_{[-0.1; 0.1]} |U(p)|^2$$

$$U_{ave} = \{|U(p)|^2\}_{[p_{max}-0.3; p_{max}+0.3]}$$

$$U_{bkg} = \{|U(p)|^2\}_{[1.0; 2.0]}$$

где  $U_{max}$  – максимальное значение спектральной плотности, полученное в интервале прицельного параметра  $p \in [-0.1 \text{ км}; 0.1 \text{ км}]$ ;

$p_{max}$  – положение спектрального максимума отраженного луча;

$U_{ave}$  – спектральная плотность, усредненная по интервалу  $[p_{max} - 0.3 \text{ км}; p_{max} + 0.3 \text{ км}]$ ;

$U_{bkg}$  – спектральная плотность фонового сигнала в диапазоне  $p \in [1 \text{ км}; 2 \text{ км}]$ .

И тогда радиоголографический индекс отражения определяется следующим образом:

$$I_R = \frac{U_{max}^2}{U_{ave}(U_{max} + \alpha U_{bkg})} \left\{ \exp \left( - \left[ \frac{p(t) - p_M(t)}{2\delta p(t)} \right]^2 \right) \right\}$$

где  $\alpha$  – параметр регуляризации, равный 0.2;

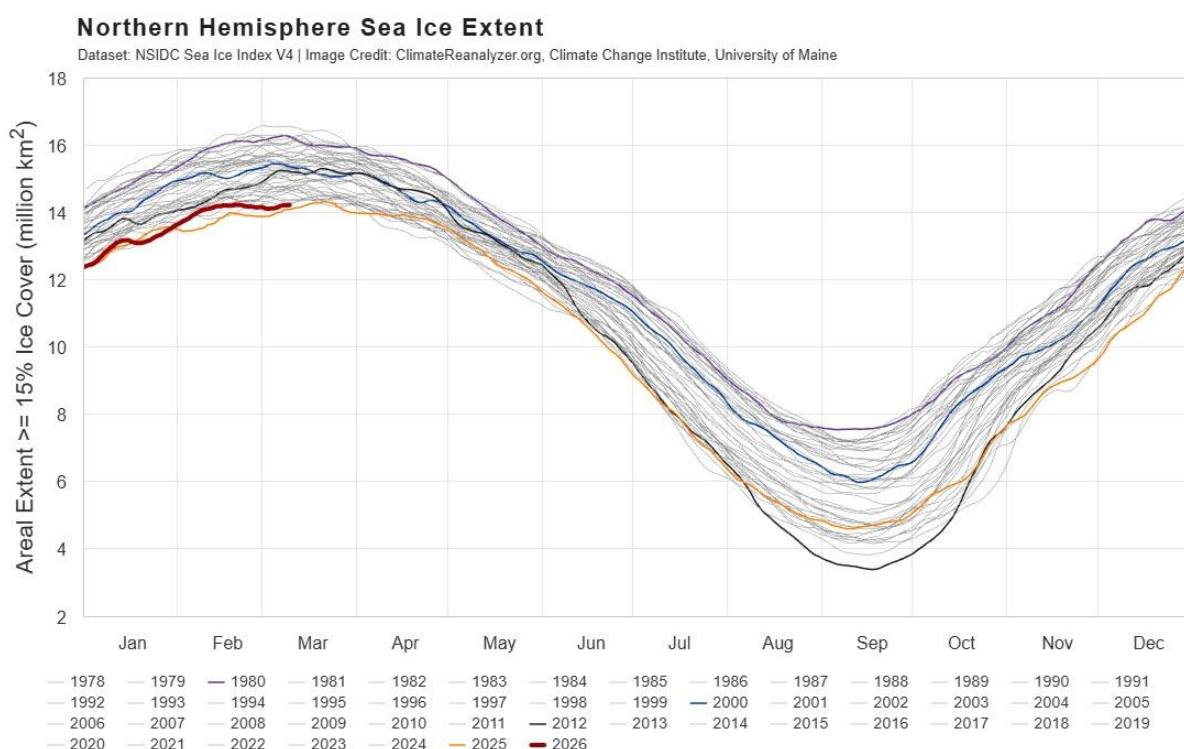
$p(t)$  и  $p_M(t)$  – зависимости отраженного и модельного отраженного прицельного параметра от времени;

$\delta p(t)$  - радиоголографическая оценка погрешности прицельного параметра.

Введенный таким образом индекс отражения характеризует наличие отраженного сигнала в радиозатменных данных. Также были оценены пороговые значения индекса отражения и показано, что индекс выше 5 указывает на существование отражения, а ниже 3 – на отсутствие.

### 3. Корреляция значений индекса отражения и данных по ледовой сплоченности ERA5

При анализе отраженных лучей, обнаруженных в радиозатменных данных эксперимента COSMIC-1/FORMOSAT-3, было замечено, что большинство отражений произошло над океаном или ледяной поверхностью. Мы сравнили значения индекса отражения с глобальными полями ледяных полей ERA5, разработанного European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Copernicus Climate Change Service. Для сравнения был выбран март 2008 года, когда в северном полушарии (выше 60° СШ) площадь льда максимальна по данным National Snow and Ice Data Center (NSIDC), The University of Colorado Boulder (рис.3).



**Рис.3. Ежедневная площадь (миллион км<sup>2</sup>) морского льда в северном полушарии на основе спутниковых данных**

На рис.4 представлены данные за 15 марта 2008 года. По оси абсцисс отложен индекс отражения, а по оси ординат доля площади морского льда из ERA5, где 1 это 100% покрытие льдом.

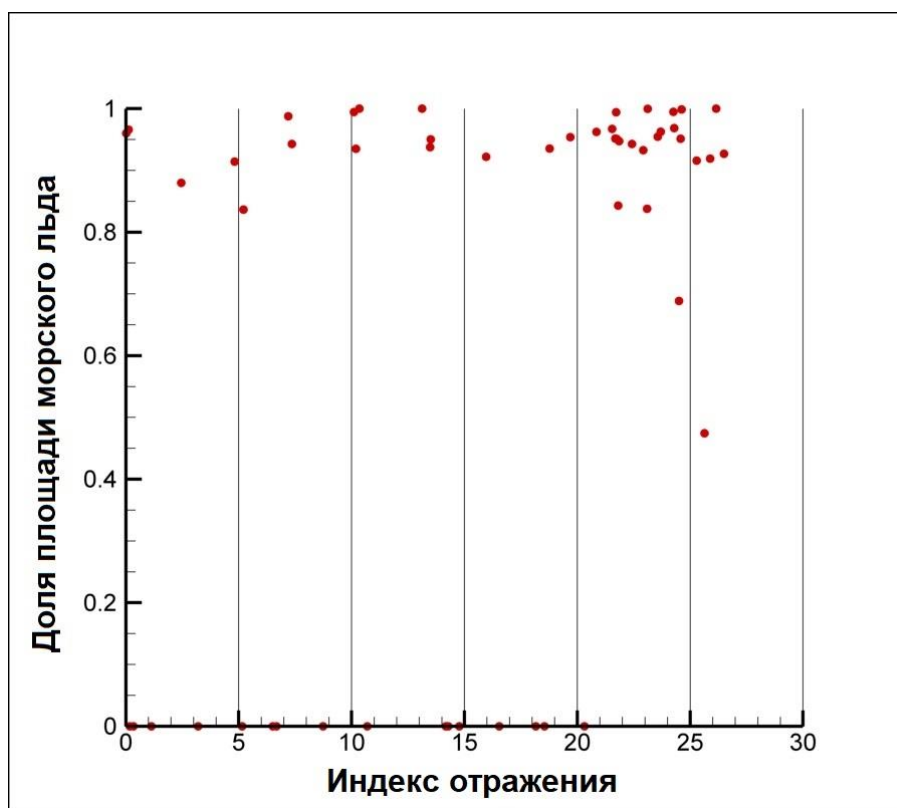


Рис. 4. Корреляция индекса отражения и сплоченности льда за 15.03.2008

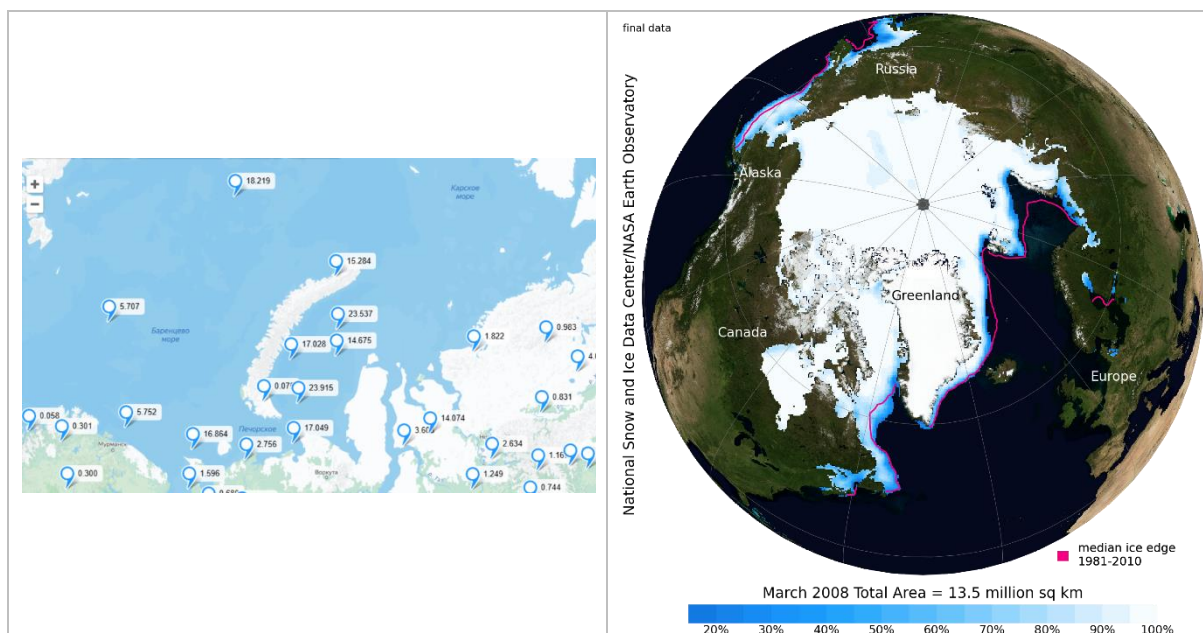


Рис 5. Значения индекса отражения в районе Баренцева моря и сплоченность льдов в северном полушарии за 15.03.2008

Из рисунка хорошо видно, что при значении индекса отражения выше 20 с большой вероятностью указывает на отражение ото льда. Для наглядности и сравнения на рис.5 значения индекса отражения нанесены на карту в районе Баренцева моря, в котором



архипелаг Новая Земля играет роль естественной границы распространения сплошного льда. На рис.5. все значения индекса около 20 и выше расположены или. восточнее Новой Земли или севернее, где океан покрыт льдом. Над земной поверхностью индекс отражения не превосходит 3-4 и можно говорить об отсутствии отражения.

На рис.6 представлена корреляция индекса отражения и сплоченности льда за весь март 2008. Здесь такой ясной картины соответствия высокого индекса отражения ( $>20$ ) и сплоченности льда не наблюдается. На рис. 7 мы нанесли на карту все координаты точек с большим индексом отражения, которые соответствуют открытой воде (коричневые точки). Часть этих событий, особенно вдоль границ льда и берега, можно объяснить тем, что данные ERA5 относятся к морскому льду и не включают лед, формирующийся на суше, такой как ледники, айсберги и ледяные щиты. К нему также не относятся шельфовые ледники, которые закреплены на суше, но выступают над поверхностью океана. Эти явления не моделируются в ERA5. Кроме этого, данные ERA5 начинаются от 15% площади ячейки сетки ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ) покрытой льдом. Ещё одним возможным объяснением таких событий может являться то, что высокий индекс отражения возникает при сильном волнении морской поверхности. Косвенно это подтверждается тем, что в тропической зоне по всему земному шару в марте 2008 года индекс отражения не превышал 14. Но это все требует дальнейшего исследования.

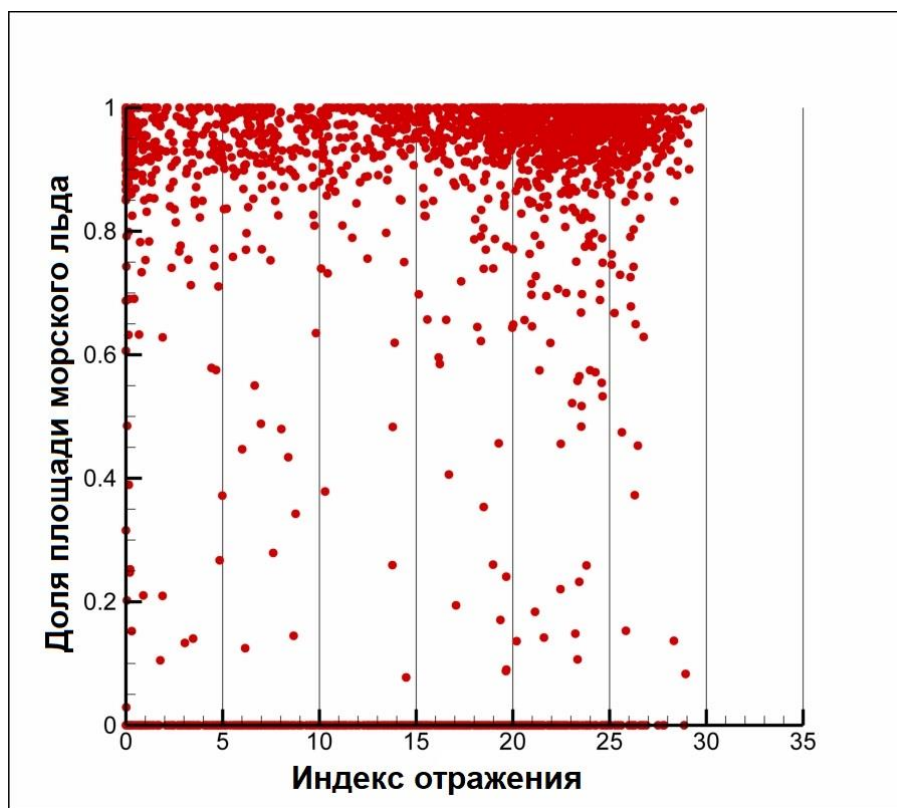
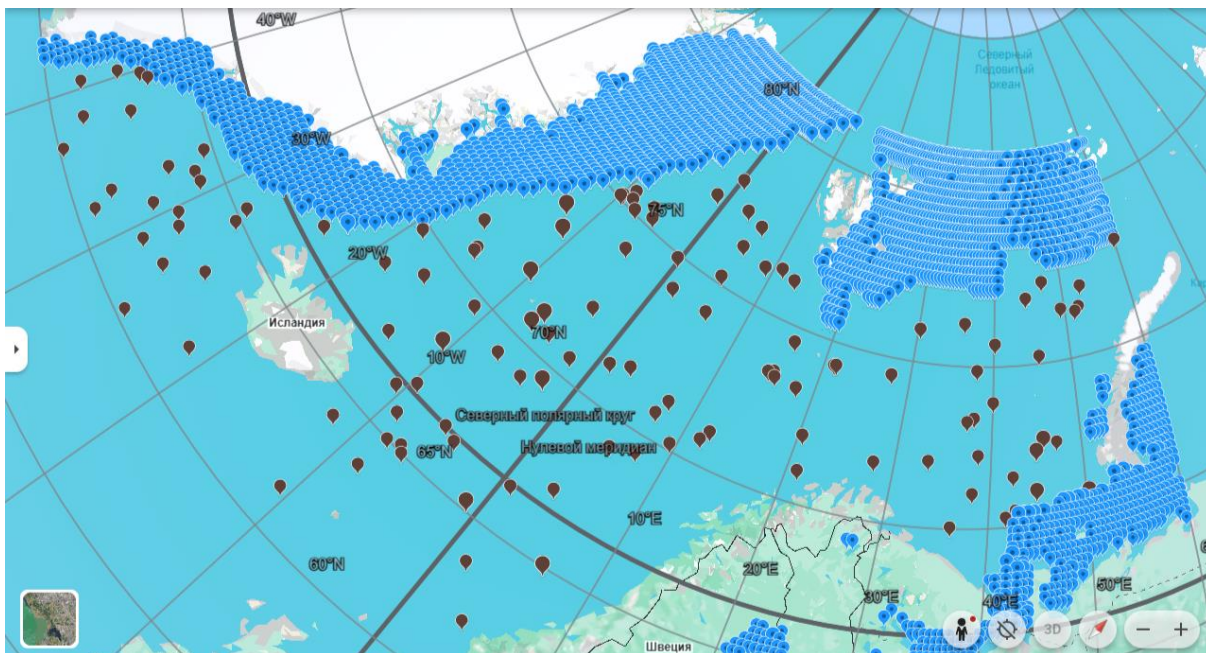


Рис.6 Корреляция индекса отражения и сплоченности льда за март 2008 года.



**Рис.7** Координаты радиозаходов с высоким индексом отражения (коричневые точки), которые расположены на открытой воде. Границы льда обозначены синими точками.

### **Выводы.**

В результате проведенных исследований продемонстрирована возможность анализа подстилающей поверхности по индексу отражения во время радиозатменных наблюдений. Выявлено четкое различие в отраженных сигналах от земной поверхности и водной или льда. Для разделения индекса отражения от чистой водной поверхности и льда требуется продолжение исследований.

*Работа выполнена при поддержке госзадания Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (FMWR-2025-0002, номер рег. карты 125020601652-8).*

### **Литература**

1. Martín-Neira M.A. (1993), Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to ocean altimetry // ESA J.. V. 17. No. 4. P. 331–355.
2. Nogues-Correig O., Cardellach G.E., Sanz Campderros J., Rius A. (2007), A GPS-reflections receiver that computes Doppler/delay maps in real time // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2007. V. 45. No. 1.P. 156–174. DOI: 10.1109/TGRS.2006.882257
3. Martín-Neira M., Colmenarejo P., Ruffini G., Serra C. (2002), Altimetry precision of 1 cm over a pond using the wide-lane carrier phase of GPS reflected signals // Canadian J. Remote Sensing. 2002. V. 28. No. 3.P. 394–403. DOI: 10.5589/m02-039.
4. Beyerle, G. and Hocke, K. (2001), Observation and simulation of direct and reflected GPS signals in radio occultation experiments, Geophys. Res. Lett., 28, 1895–1898. DOI: 10.1029/2000GL012530
5. Gorbunov, M.E. (2002) Radio-holographic analysis of Microlab-1 radio occultation data in the lower troposphere, J. Geophys. Res.-Atmos., 107, 7–1–7–10, DOI: 10.1029/2001JD000889.
6. Gorbunov, M.E. (2002) Radioholographic analysis of radio occultation data in multipath zones, Radio Sci., 37, 14–1–14–9, DOI: 10.1029/2000RS002577.



7. Ware R, Exner M, Feng D, Gorbunov M, Hardy K, Herman B, Kuo Y, Meehan T, Melbourne W, Rocken C, Schreiner W. (1996), GPS sounding of the atmosphere from low Earth orbit: Preliminary results. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Jan;77(1):19-40. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0019:GSOTAF>2.0.CO
8. Gorbunov, M.E., Gurvich A.S., and Bengtsson L. (1996), Advanced algorithms of inversion of GPS/MET satellite data and their application to reconstruction of temperature and humidity, Rep. 211, Max-Planck Inst. für Meteorol., Hamburg, Germany.
9. Gorbunov, M.E., and Gurvich A.S. (1998), Algorithms of inversion of Microlab-1 satellite data including effects of multipath propagation, *Int. J. Remote Sens.*, 19(12), 2283–2300. DOI: 10.1080/014311698214721
10. Gorbunov, M. E., and Gurvich A.S. (1998), Microlab-1 experiment: Multipath effects in the lower troposphere, *J. Geophys. Res.*, 103(D12), 13,819–13,826. DOI: 10.1029/98JD00806
11. Sokolovskiy, S.V. (2001), Modeling and inverting radio occultation signals in the moist troposphere, *Radio Sci.*, 36(3), 441–458. DOI: 10.1029/1999RS002273
12. Karayel, T.E., and Hinson D.P. (1997), Sub-Fresnel scale resolution in atmospheric profiles from radio occultation, *Radio Sci.*, 32(2), 411–423. DOI: 10.1029/96RS03212
13. Lindal, G.F., Lyons J.R., Sweetnam D.N., Eshleman V.R., Hinson D.P., and Tyler G.L. (1987), The atmosphere of Uranus: Results of radio occultation measurements with Voyager 2, *J. Geophys. Res.*, 92(A13), 14,987–15,001. DOI: 10.1029/JA092iA13p14987
14. Pavelyev, A.G. (1998), On the feasibility of radioholographic investigations of wave fields near the Earth's radio-shadow zone on the satellite-to-satellite path, *J. Comm. Technol. Electr.*, 43(8), 875–879.
15. Hocke, K., Pavelyev A., Yakovlev O., Barthes L., and Jakowski N. (1999), Radio occultation data analysis by the radio holographic method, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 61, 1169–1177. DOI: 10.1016/S1364-6826(99)00080-2
16. Gorbunov, M.E., Gurvich A.S., and Kornblueh L. (2000), Comparative analysis of radioholographic methods of processing radio occultation data, *Radio Sci.*, 35(4), 1025–1034. DOI: 10.1029/1999RS002247
17. Sokolovskiy, S.V. (2001), Modeling and inverting radio occultation signals in the moist troposphere, *Radio Sci.*, 36(3), 441–458. DOI: 10.1029/1999RS002273
18. Gorbunov, M.E. (2002), Canonical transform method for processing radio occultation data in the lower troposphere, *Radio Sci.*, 37(5), 1076, doi:10.1029/2000RS002592.
19. Gorbunov, M.E. and Lauritsen, K.B. (2004) Analysis of wave fields by Fourier integral operators and its application for radio occultations, *Radio Sci.*, 39, RS4010, DOI: 10.1029/2003RS002971.
20. Gorbunov M.E., Cardellach E., and Lauritsen K.B. (2018), Reflected ray retrieval from radio occultation data using radio holographic filtering of wave fields in ray space, *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 1181–1191, DOI: 10.5194/amt-11-1181-2018
21. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред - М: Наука, 1980, с.304.
22. Мищенко А.С., Стернин Б.Ю., Шаталов В.Е. Лагранжевы многообразия и метод канонического оператора – М. Наука, 1978, с.352.