

**Восстановление профилей коэффициента поглощения
дециметровых радиоволн (~19 см) в нижней ионосфере
Земли путем решения обратной задачи о поглощении
сигнала в радиозатменных измерениях во время
магнитной бури в июне 2015 года**

Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А.,

*ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, пл. акад. Б.А. Введенского,
дом 1, 141190 Фрязино, Московская обл., Россия*

E-mail: vngubenko@gmail.com, gubenko@fireras.su

**Двадцать первая международная конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»
13 - 17 ноября 2023 года, ИКИ РАН, Москва**

Введение: По результатам анализа радиозатменных измерений *FORMOSAT-3/COSMIC* обнаружено интегральное поглощение дециметровых (ДМ) радиоволн (длина волны ~ 19 см) в нижней ионосфере Земли во время магнитной бури в июне 2015 года (Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2021; Gubenko et al., *Geomagn. Aeron.*, 2021). Предложен метод восстановления вертикальных профилей коэффициента поглощения путем решения обратной задачи в ионосфере планеты. В данном случае, способ решения обратной задачи о поглощении радиоволн не использует преобразование Абеля. Оценкой погрешности при восстановлении вертикального профиля коэффициента поглощения служит абсолютная величина его максимальной невязки при решении обратной задачи (Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2022; Andreev et al., *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021). Предлагаемый метод является общим и может быть применен для различных диапазонов радиоволн и других сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Надежно идентифицированы слои поглощения в радиозатменных сеансах измерений, которые обусловлены мощными всплесками рентгеновского излучения и сильными изменениями геомагнитных условий во время основной фазы магнитной бури.

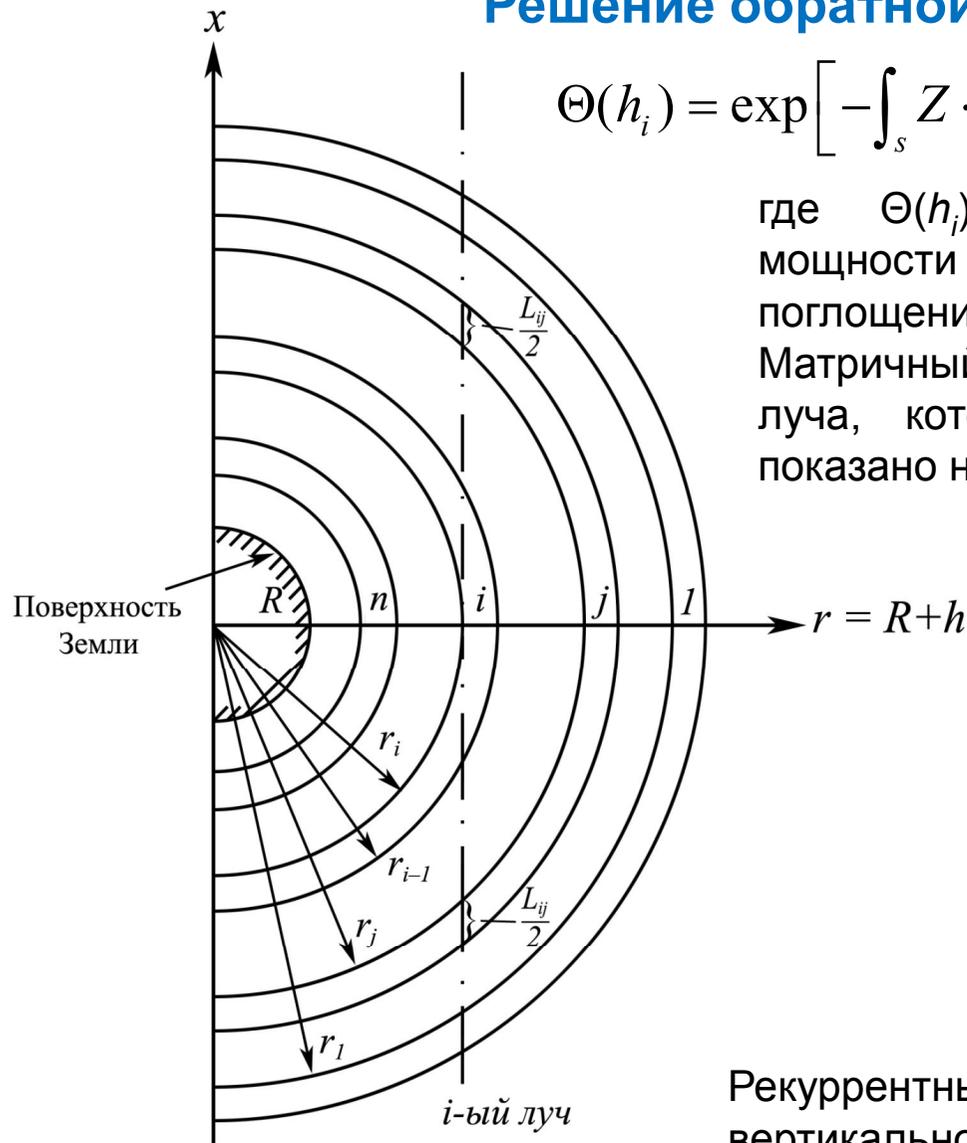
Найдено, что во время бури на высотах от ~90 до ~100 км в ионосфере Земли величина коэффициента поглощения ДМ-радиоволн достигала значений $(5.7 \pm 1.4) \cdot 10^{-3}$ дБ/км (Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2022). До настоящего времени радиозатменные измерения не использовались для исследования поглощения радиоволн на GPS-частотах в нижней ионосфере Земли. Это было обусловлено тем, что в спокойной геомагнитной обстановке, по данным радиозатменных измерений, имели место только слабые возмущения в *E*-и *D*-областях ионосферы без каких-либо признаков поглощения ДМ-радиоволн (Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2021; Gubenko et al., *Geomagn. Aeron.*, 2021). Практическая значимость изучения эффектов поглощения радиоволн в *D*- и *E*-областях ионосферы планеты связана с обеспечением бесперебойной работы систем космической радиосвязи и навигации.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Экспериментальные данные

Исходные экспериментальные данные о нормированной мощности $P(h)$ радиоволн были сначала отфильтрованы методом скользящего среднего по 50 точкам. Таким образом, были получены усредненные вертикальные профили нормированной мощности $\Theta(h)$ дециметрового сигнала. Здесь $h = r - R$ – высота анализируемого слоя над поверхностью Земли, $R = 6371$ км – средний радиус планеты, r – расстояние от центра планеты до ионосферного слоя. При вертикальной скорости опускания луча в ионосфере Земли ~ 2 км/сек, это соответствует усреднению данных по вертикальному интервалу в ~ 2 км. При таком усреднении информация о мелкомасштабной структуре ионосферы практически не теряется, поскольку вертикальное разрешение при анализе методом геометрической оптики (ГО) равно $2 \cdot (\lambda \cdot L_L)^{1/2} = 1.5$ км, где λ – длина волны сигнала (~ 19 см), L_L – расстояние от низкоорбитального спутника *LEO* до атмосферного лимба планеты (~ 3000 км). В геометрической оптике считается, что два физических луча (лучи вместе с их френелевскими объёмами) являются различимыми, если они не пересекаются друг с другом. Анализ профилей рефракционного ослабления $X(h)$ показал, что регулярное (осредненное) рефракционное ослабление $\langle X \rangle$ мощности радиоволн в сеансах измерений на высотах > 50 км практически отсутствует. Поэтому мы полагаем, что наблюдаемое ослабление средней мощности $\langle P(h) \rangle$ сигнала может быть связано с поглощением радиоволн в нижней ионосфере Земли во время магнитной бури (Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2021; Gubenko et al., *Geomagn. Aeron.*, 2021; Andreev et al., *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021).

Решение обратной задачи о поглощении радиоволн



$$\Theta(h_i) = \exp \left[- \int_s Z \cdot dL \right] = \exp \left[- \sum_{j=1}^i L_{ij} \cdot Z_j \right], \text{ где } i = 1 \dots n,$$

где $\Theta(h_i)$ является величиной нормированной мощности Θ сигнала для i -го луча, а Z_j – коэффициент поглощения мощности радиоволн в j -ом слое. Матричный элемент L_{ij} означает длину той части i -го луча, которая заключена внутри j -го слоя, как показано на Рис. 1.

$$Z_1 = - \frac{\Theta_{dB}(h_1)}{4.343 \cdot L_{11}}$$

$$Z_2 = \left(- \frac{\Theta_{dB}(h_2)}{4.343} - L_{21} \cdot Z_1 \right) / L_{22}$$

.....

$$Z_i = \left(- \frac{\Theta_{dB}(h_i)}{4.343} - \sum_{j=1}^{i-1} L_{ij} \cdot Z_j \right) / L_{ii}$$

.....

Рекуррентные соотношения для определения вертикального профиля $Z(h_i)$ при решении обратной задачи о поглощении радиоволн в ионосфере (Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2022).

Рис. 1. Разрез ионосферы Земли, состоящей из n сферических слоев.

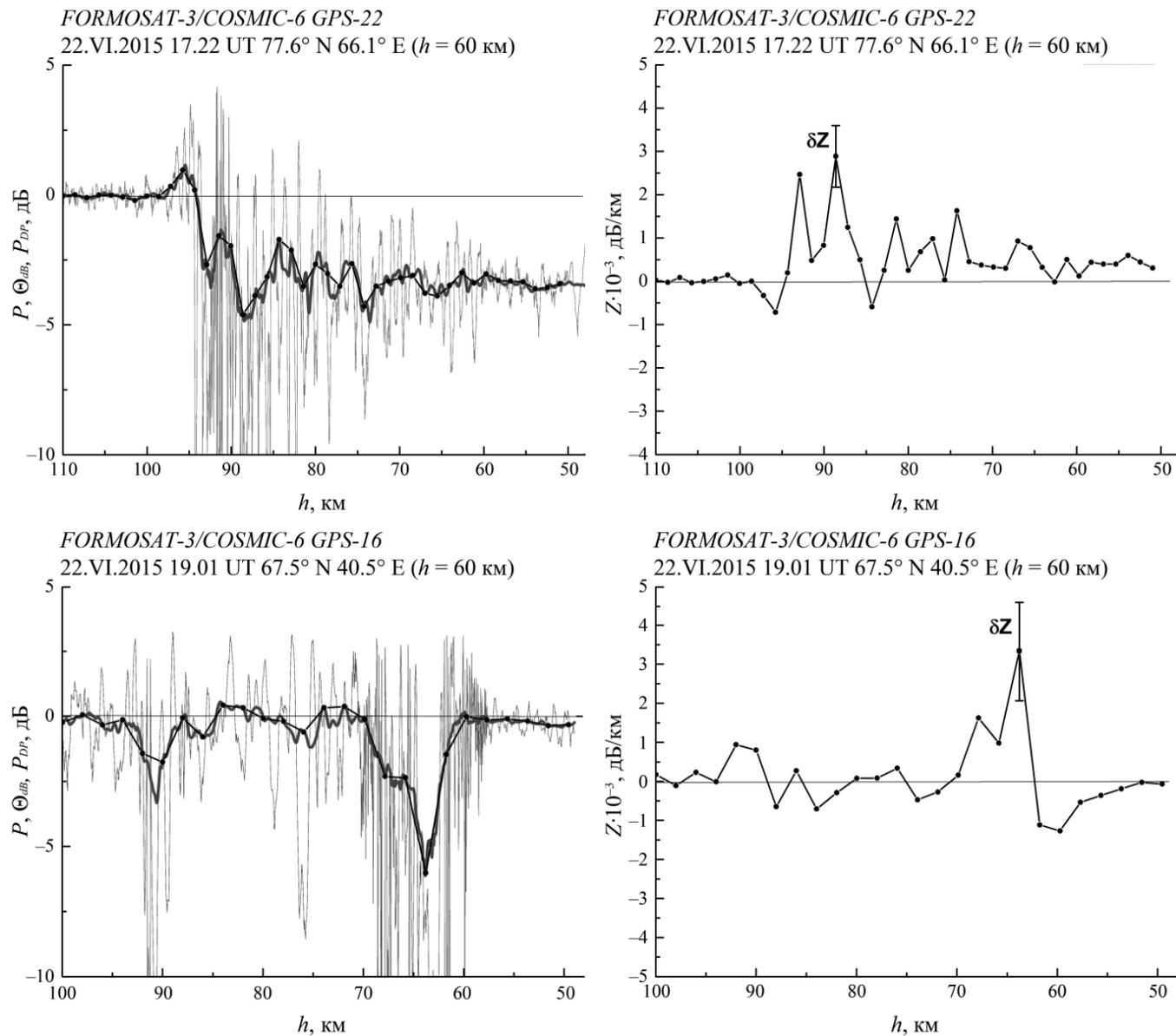


Рис. 2. Вертикальные профили нормированной мощности – $P(h)$ (сплошная тонкая с изломами), нормированной мощности после фильтрации – $\Theta_{dB}(h)$ (сплошная толстая), нормированной мощности из решения прямой задачи радиозондирования – $P_{DR}(h)$ (сплошная тонкая) и коэффициента поглощения ДМ-радиоволн $Z(h)$, полученные в сеансах радиозатменных измерений 17.22 UT (верхняя панель) и 19.01 UT (нижняя панель) 22 июня 2015 года в ионосфере Земли. Справа указаны погрешности δZ восстановления профилей коэффициента поглощения $Z(h)$ (Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2022).

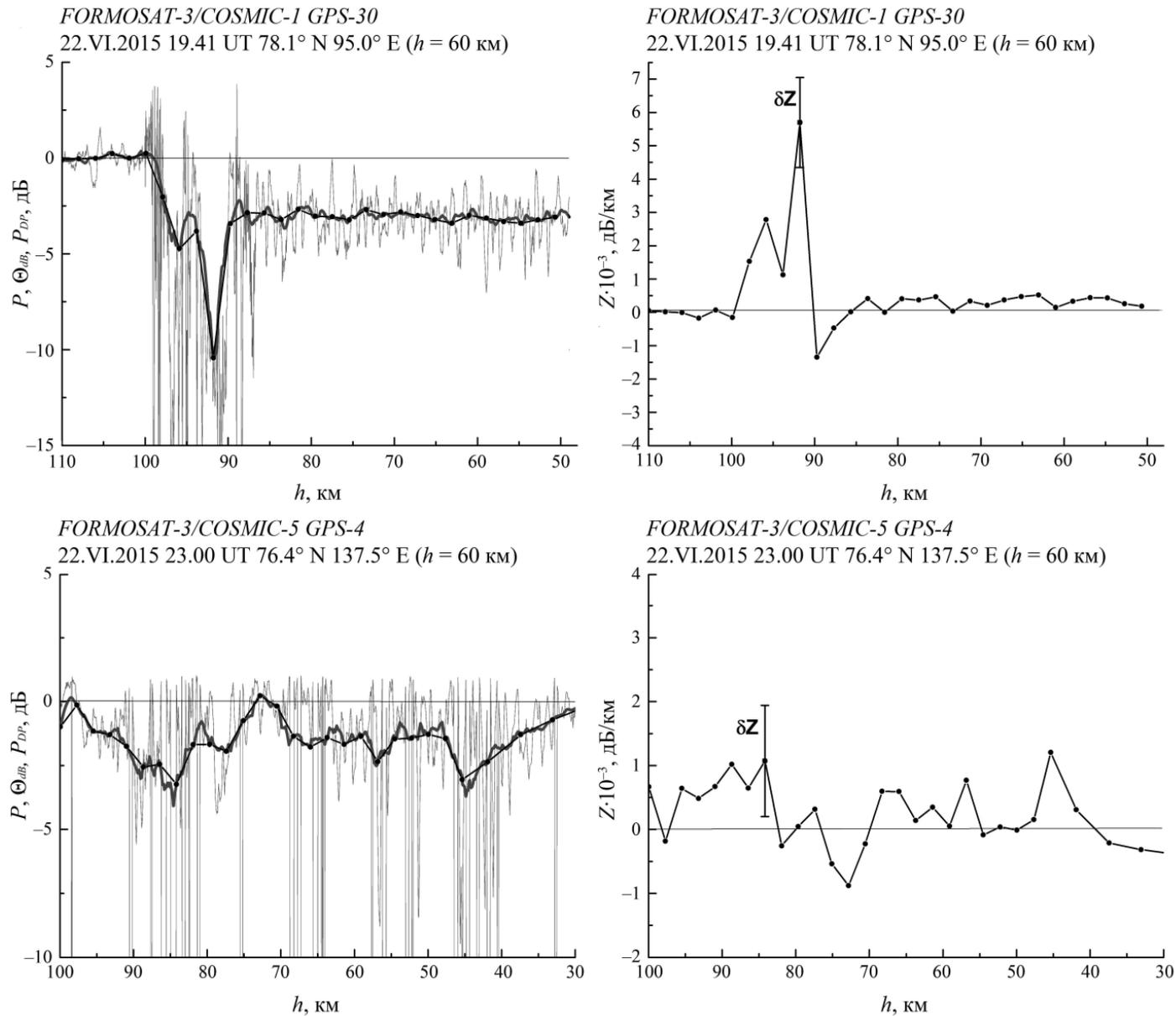


Рис. 3. Профили нормированной мощности – $P(h)$, нормированной мощности после фильтрации – $\Theta_{AB}(h)$, нормированной мощности из решения прямой задачи радиозондирования – $P_{DP}(h)$ и коэффициента поглощения ДМ-радиоволн $Z(h)$, полученные в сеансах радиозатменных измерений 19.41 UT (верхняя панель) и 23.00 UT (нижняя панель) 22 июня 2015 года в ионосфере планеты. Здесь обозначения такие же, как и на рис. 2 (Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2022).

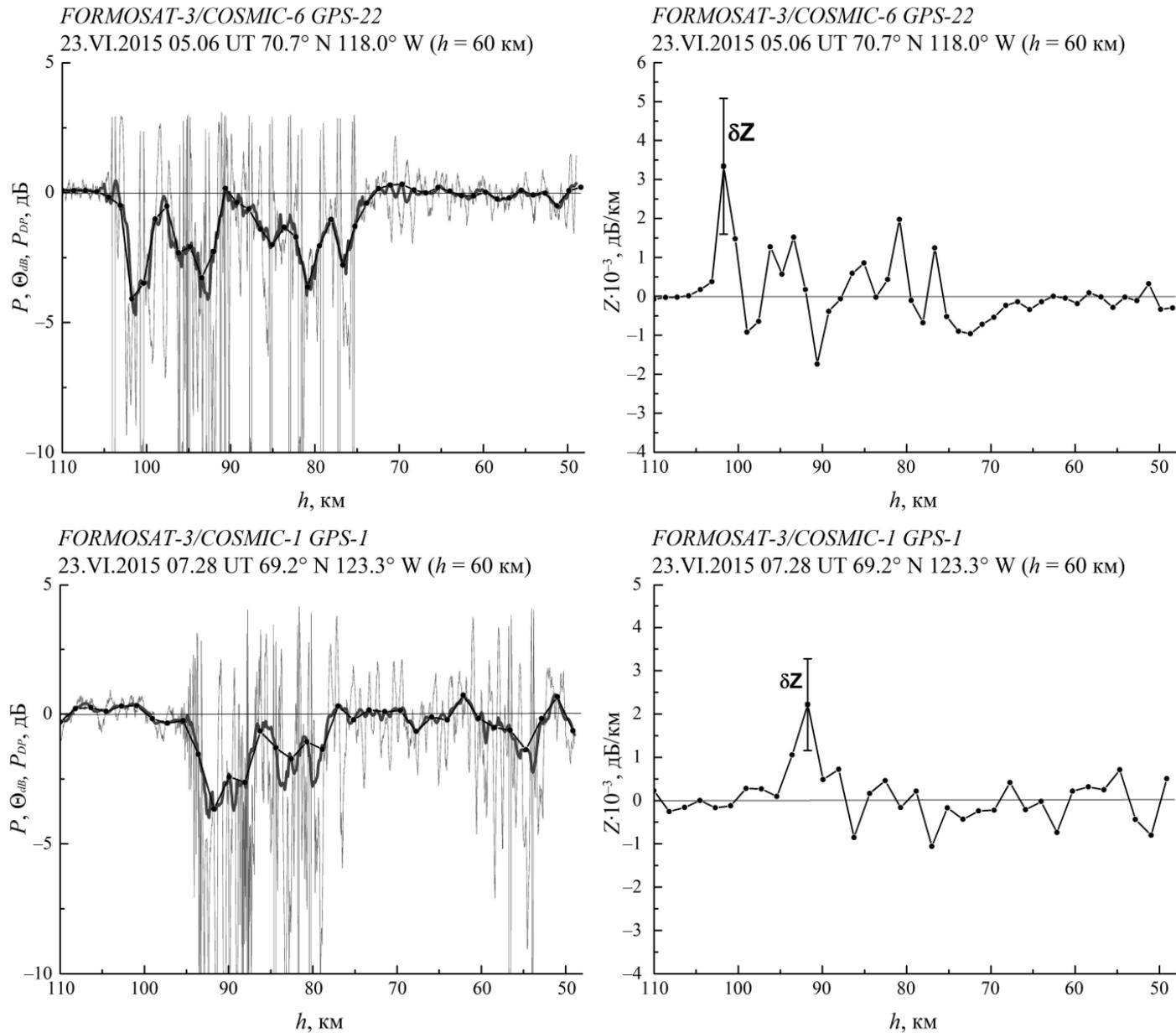


Рис. 4. Профили нормированной мощности – $P(h)$, нормированной мощности после фильтрации – $\Theta_{dB}(h)$, нормированной мощности из решения прямой задачи радиозондирования – $P_{DP}(h)$ и коэффициента поглощения ДМ-радиоволн $Z(h)$, полученные в сеансах радиозатменных измерений 05.06 UT (верхняя панель) и 07.28 UT (нижняя панель) 23 июня 2015 года в ионосфере Земли (Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2022).

Коэффициент поглощения дециметровых радиоволн (Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2022)

Таблица 1. Высотные интервалы поглощения ДМ-радиоволн в ионосфере Земли, высоты h_{\max} максимумов коэффициента поглощения и значения максимумов Z_{\max}

Дата измерений	Время измерений	Номер спутника LEO	Номер спутника GPS	Широта и долгота района измерений ($h \sim 60$ км)	Высотный интервал поглощения, км	Высота максимума коэф. поглощения h_{\max} , км	Значение максимума коэф. поглощения $(Z_{\max} \pm \delta Z) \cdot 10^{-3}$, дБ/км
22.VI.2015	17.22 UT	6	22	77.6° N 66.1° E	96–72	92.9 88.6 81.4 74.2	2.5 ± 0.7 2.9 ± 0.7 1.4 ± 0.7 1.6 ± 0.7
22.VI.2015	19.01 UT	6	16	67.5° N 40.5° E	70–62	67.8 63.8	1.6 ± 1.3 3.3 ± 1.3
22.VI.2015	19.41 UT	1	30	78.1° N 95.0° E	100–91	95.8 91.8	2.8 ± 1.4 5.7 ± 1.4
22.VI.2015	23.00 UT	5	4	76.4° N 137.5° E	99–43	88.7 84.2 45.4	1.0 ± 0.9 1.0 ± 0.9 1.2 ± 0.9
23.VI.2015	05.06 UT	6	22	70.7° N 118.0° W	104–74	101.7 80.8	3.3 ± 1.7 2.0 ± 1.7
23.VI.2015	07.28 UT	1	1	69.2° N 123.3° W	95–79	91.8	2.2 ± 1.1

Заключение:

Предложен метод восстановления вертикальных профилей коэффициента поглощения ДМ-радиоволн с помощью решения обратной задачи радиозондирования в нижней ионосфере Земли. Этот метод является общим и может быть использован для различных диапазонов радиоволн и других ГНСС-сигналов. Надёжно идентифицированы слои поглощения в радиозатменных сеансах измерений во время бури 22–23.VI.2015. Найдено, что на высотах от ~90 до ~100 км величина коэффициента поглощения ДМ-радиоволн достигала значений $(5.7 \pm 1.4) \cdot 10^{-3}$ дБ/км. Практическая значимость изучения эффектов поглощения радиоволн в *D*- и *E*-областях ионосферы связана с обеспечением бесперебойной работы систем космической радиосвязи и навигации.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Литература:

Andreev, V.E., Gubenko, V.N., Kirillovich, I.A. GPS L1 signals absorption in high-latitude lower ionosphere during severe geomagnetic storm in June 2015 // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1991. No. 1. 012006, doi: 10.1088/1742-6596/1991/1/012006.

Gubenko, V.N., Andreev, V.E., Kirillovich, I.A., Gubenko, T.V., Pavelyev, A.A. Variations in the Parameters of Radio Waves in the Earth's High-Latitude Ionosphere on the Satellite–Satellite Paths during the Geomagnetic Storm of June 22–23, 2015 // Cosmic Research. 2021. V. 59. No. 3. P. 157–161, doi: 10.1134/S0010952521030047.

Gubenko V.N., Andreev V.E., Kirillovich I.A., Gubenko T.V., Pavelyev A.A., Gubenko D.V. Radio Occultation Studies of Disturbances in the Earth's Ionosphere During a Magnetic Storm on June 22–23, 2015 // Geomagnetism and Aeronomy. 2021, V. 61, No. 6. P. 713–722, doi: 10.1134/S0016793221060050.

Gubenko, V.N., Andreev, V.E., Kirillovich, I.A., Gubenko, T.V., Pavelyev, A.A., Gubenko, D.V. The Absorption Coefficient of Decimeter Radio Waves (~19 cm) in the Earth's Ionosphere Based on the Inverse Problem Solution in Radio Occultation Satellite Studies during the June 2015 Magnetic Storm // Cosmic Research. 2022. V. 60. No. 6. P. 437–444, doi: 10.1134/S001095252206003X.

Спасибо за внимание!