

УДК 551.51:551.501

КОЭФФИЦИЕНТ ПОГЛОЩЕНИЯ ДЕЦИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН (~19 см) В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ В РАДИОЗАТМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ В ИЮНЕ 2015 г.

© 2022 г. В. Н. Губенко¹*, В. Е. Андреев¹, И. А. Кириллович¹, Т. В. Губенко¹, А. А. Павельев¹, Д. В. Губенко¹

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

*vngubenko@gmail.com

Поступила в редакцию 28.02.2022 г.

После доработки 25.04.2022 г.

Принята к публикации 04.05.2022 г.

По результатам анализа радиозатменных данных *FORMOSAT-3/COSMIC* обнаружено поглощение дециметровых (ДМ) радиоволн (длина волны ~19 см) в нижней высокоширотной ионосфере Земли. Предложен метод восстановления вертикальных профилей коэффициента поглощения путем решения обратной задачи радиозондирования в нижней ионосфере Земли. Этот метод является общим и может быть использован 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 бури. 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.

DOI: 10.31857/S0023420622060036

1. ВВЕДЕНИЕ

Ранее нами были проведены обработка и анализ ~100 сеансов радиозатменных спутниковых измерений *FORMOSAT-3/COSMIC*, выполненных во время геомагнитной бури 22–23.VI.2015 в высокоширотной ионосфере Земли [1, 2]. Было показано, что ионосферные возмущения характеристик радиоволн обусловлены как геомагнитными условиями, так и активностью мощных рентгеновских вспышек во время измерений. Для радиозатменных сеансов измерений, проведенных после начала (16.30 UT 22.VI.2015) мощных всплесков рентгеновского излучения и во время (18.36 UT 22.VI–02.00 UT 23.VI) главной фазы магнитной бури, были характерны повышенные уровни электронной плотности в *D*- и *E*-областях ионосферы планеты. Нами также был проведен поиск поглощения дециметровых (ДМ) радиоволн (длина волны сигнала ~19 см) на несущей *GPS*-частоте $f_1 = 1545.42$ МГц. По результатам анализа измерений эйконала и интенсивности ДМ-сигнала спутников *FORMOSAT-3/COSMIC*, впервые было обнаружено поглощение радиоволн ДМ-диапазона в *D*- и *E*-областях высокоши-

ротной ионосферы Земли [1, 2]. Было найдено, что абсолютная величина интегрального поглощения на трассах радиозатменного зондирования составляет ~3 дБ в интервале высот ~50–90 км, а в отдельных случаях она достигает ~10 дБ на уровнях от ~90 до ~95 км.

В работах [3, 4] представлены выражения для определения рефракционного ослабления (X) мощности радиоволн:

$$1 - X(t) = ma_\psi = md^2\psi/dt^2, \quad (1)$$

$$m = r_\psi / (dp_0/dt)^2, \quad r_\psi = L_L L_G / L_0,$$

где a_ψ – ускорение эйконала (фазового пути ψ), p_0 – прицельный параметр радиолуча, L_L и L_G – расстояния от приемника (*LEO*) до передатчика (*GPS*). Существует связь между рефракционным ослаблением X и нормированной мощностью сигнала (P), измеренной на низкоорбитальном спутнике *FORMOSAT-3/COSMIC*. Для нахождения безразмерной величины P , мощность P_L принятого на низкоорбитальном спутнике сигнала нормировалась на среднее значение мощности (P_0) радиоволн на высотах более 300 км, то есть $P = P_L/P_0$.

Интегральное поглощение (Γ) радиозатменно-го ДМ-сигнала можно определить с помощью следующего соотношения:

$$\begin{aligned} \Gamma (\text{отн. ед.}) &= P (\text{отн. ед.}) / X (\text{отн. ед.}), \\ \Gamma (\text{дБ}) &= P (\text{дБ}) - X (\text{дБ}). \end{aligned} \quad (2)$$

Практическая значимость изучения эффектов поглощения радиоволн в D - и E -областях ионосферы Земли связана с обеспечением бесперебойной работы систем космической радиосвязи и навигации. Возможность определения поглощения в атмосфере и ионосфере Земли ранее обсуждалось в работах [5–9]. Поглощение является функцией от метеопараметров и частоты и его можно использовать для формулировки обратной задачи восстановления метеопараметров. Измерения поглощения в трех частотных каналах (при достаточно высокой точности измерения амплитуды сигнала) позволяет восстанавливать профили давления, температуры и влажности без априорной информации [10].

Целью этой работы является восстановление высотных профилей коэффициента поглощения $Z(h)$ дециметрового сигнала на высотах ниже ~ 100 км во время магнитной бури 2015 г. путем решения обратной задачи о поглощении радиоволн.

2. МЕТОД РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ О ПОГЛОЩЕНИИ РАДИОВОЛН

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/с, 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 $2(\lambda L_L)^{1/2} = 1.5$ 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 объемами) 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 [1, 2, 11].

Рассмотрим более подробно, каким образом можно сделать обратное преобразование уравнения (3) для того, чтобы получить вертикальный профиль коэффициента поглощения $Z(h)$:

$$\Theta(h) = \exp \left[- \int_s Z dL \right]. \quad (3)$$

Интегрирование в выражении (3) производится по траектории s зондирующего ионосферу радиолуча. Описываемая здесь процедура основана на том предположении, что ионосфера Земли является сферически симметричной. Геометрия задачи показана на рис. 1, где n лучей проходит через ионосферу планеты, состоящую из n сферических слоев. Рис. 1 иллюстрирует и объясняет способ решения обратной задачи о поглощении радиоволн, в котором не используется преобразование Абеля. Каждый слой ионосферы имеет постоянный коэффициент поглощения Z и постоянную толщину $\Delta r = \Delta h = 2$ км. Например, если анализируется интервал высот от 110 до 50 км, то число ионосферных слоев равно $n = 30$. Здесь удобно заменить уравнение (3) системой из n линейных уравнений вида:

$$\Theta(h_i) = \exp \left[- \int_s Z dL \right] = \exp \left[- \sum_{j=1}^i L_{ij} Z_j \right], \quad (4)$$

где $i = 1 \dots n$,

где $\Theta(h_i)$ является величиной Θ 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.

Выразим $\Theta(h_i)$ в децибелах и развернем указанные выше выражения (4) в виде матричного уравнения:

$$\Theta_{dB}(h_i) = 10 \lg(\Theta(h_i)) = \begin{bmatrix} \Theta_{dB}(h_1) \\ \Theta_{dB}(h_2) \\ \vdots \\ \Theta_{dB}(h_i) \\ \vdots \\ \Theta_{dB}(h_n) \end{bmatrix} = -10 \lg(e) \times \begin{matrix} \times \\ \begin{bmatrix} L_{11} & & & & \\ L_{21} & L_{22} & & & \\ \dots & \dots & \dots & & \\ L_{i1} & L_{i2} & \dots & L_{ii} & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \\ L_{n1} & L_{n2} & \dots & L_{ni} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_i \\ \vdots \\ Z_n \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad (5)$$

где $e = 2.718\dots$ – основание натуральных логарифмов; $10 \lg(e) = 4.343\dots$; $j = 1 \dots i$; $i = 1 \dots n$; Z_i – коэффициент поглощения радиоволн в слое i .

Двумерная матрица L_{ij} связана с радиусом слоев ионосферы Земли как

$$L_{ij} = 2 \left[\sqrt{r_{j-1}^2 - r_i^2} - \sqrt{r_j^2 - r_i^2} \right] = 2 \left[\sqrt{(R + h_{j-1})^2 - (R + h_i)^2} - \sqrt{(R + h_j)^2 - (R + h_i)^2} \right], \quad (6)$$

для $i > j$ и как

$$L_{ii} = 2\sqrt{r_{i-1}^2 - r_i^2} = 2\sqrt{(R + h_{i-1})^2 - (R + h_i)^2}, \quad (7)$$

для $i = j$.

Решая матричное уравнение (5) относительно Z , получаем:

$$\begin{aligned} Z_1 &= -\frac{\Theta_{dB}(h_1)}{4.343L_{11}}, \\ Z_2 &= \left(-\frac{\Theta_{dB}(h_2)}{4.343} - L_{21}Z_1 \right) / L_{22}, \\ \dots \dots \dots \\ Z_i &= \left(-\frac{\Theta_{dB}(h_i)}{4.343} - \sum_{j=1}^{i-1} L_{ij}Z_j \right) / L_{ii}, \\ \dots \dots \dots \end{aligned} \quad (8)$$

Решение обратной задачи дает нам рекуррентные соотношения, которые явным образом связывают величины $Z(h_i)$ с $\Theta_{dB}(h_i)$.

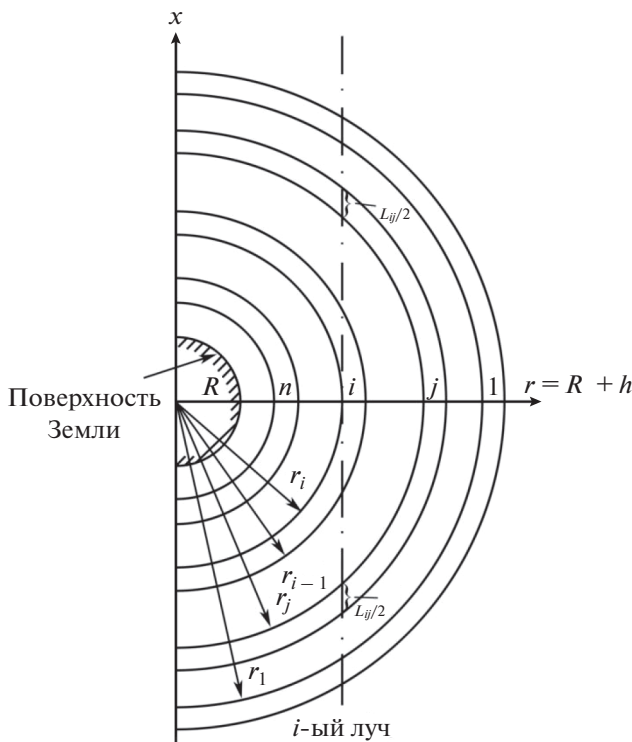


Рис. 1. Разрез ионосферы Земли, состоящей из n сферических слоев.

Таким образом, нами определялись вертикальные профили $Z(h)$ коэффициента поглощения радиоволн с масштабom высоты ~ 2 км и оценивались погрешности их восстановления δZ для каждого анализируемого радиозатменного сеанса измерений. Оценкой погрешности δZ для анализируемого профиля $Z(h)$ служила абсолютная величина его максимальной невязки при решении обратной задачи о поглощении радиоволн. Проверка соответствия восстановленных профилей коэффициента поглощения исходным экспериментальным данным проводилась с помощью решения прямой задачи радиозондирования для слоев с шириной ~ 2 км. В этом случае, вычисляемая мощность потока радиоволн $P_{DP}(h_i)$ определялась по формуле:

$$P_{DP}(h_i) = - \left[\sum_{j=1}^{i-1} L_{ij}Z_j + L_{ii}Z_i \right] \times 4.343. \quad (9)$$

3. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью решения обратной задачи радиозондирования были найдены вертикальные профили коэффициента поглощения ДМ-радиоволн и определены погрешности их восстановления в нижней ионосфере Земли. Анализ результатов показывает, что геомагнитные условия главной фазы бури и мощные всплески потоков рентгеновского излучения во время измерений сильно влияли на распространение радиоволн в E- и D-слоях ионосферы Земли. Проверка полученных результатов путем решения прямой задачи радиозондирования показала хорошее соответствие между расчетными и исходными экспериментальными данными:

$$P_{DP}(h_i) \approx \Theta_{dB}(h_i). \quad (10)$$

На рис. 2 показаны 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 $-P_{DP}(h)$ (сплошная тонкая) и коэффициента поглощения ДМ-радиоволн $Z(h)$, полученные в сеансах радиозатменных измерений 17.22 UT (панели (а) и (б)) и 19.01 UT (панели (в) и (г)) 22 июня 2015 г. в ионосфере Земли. Для каждого анализируемого сеанса указаны широта и долгота зондируемого района, дата и

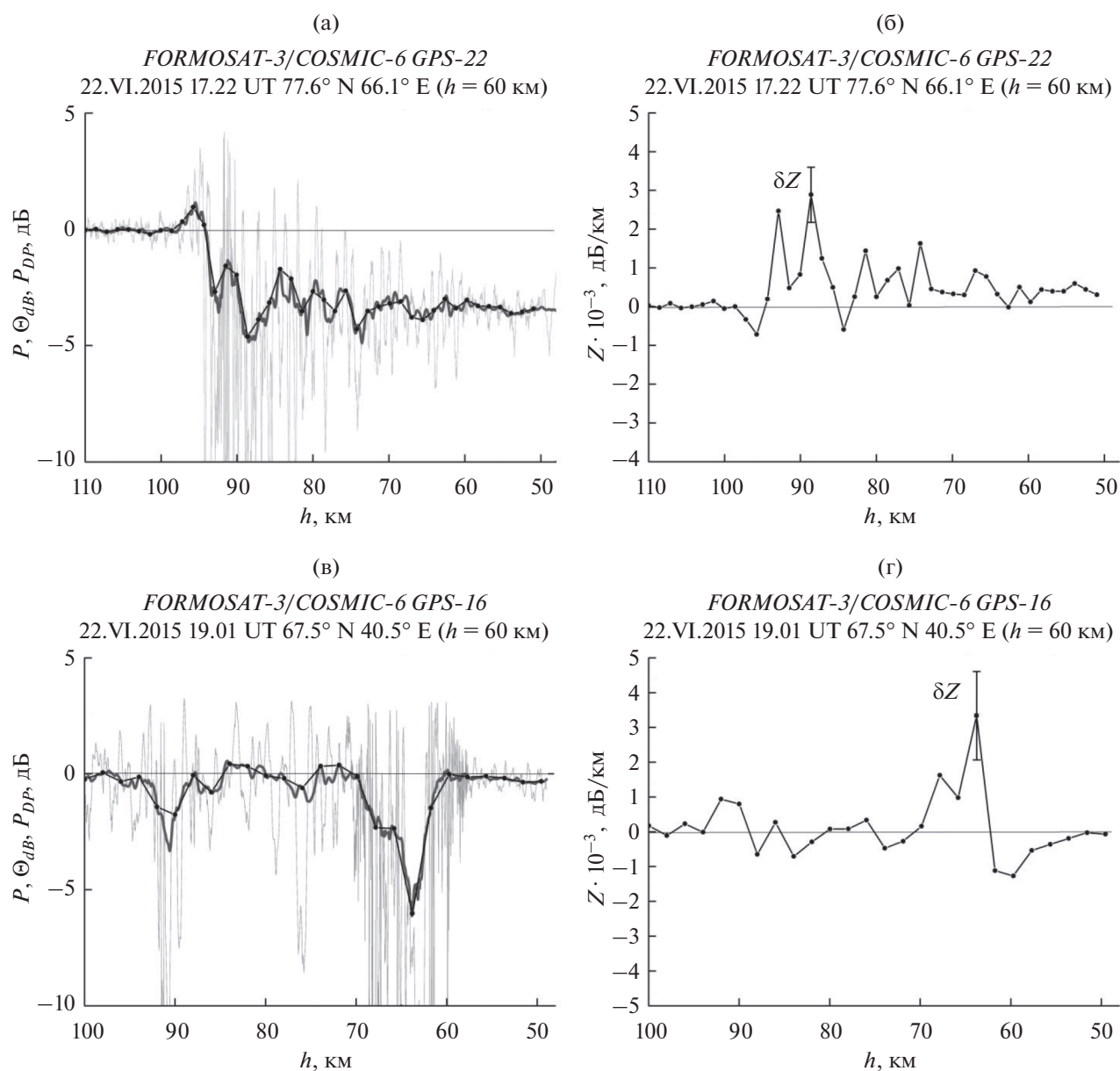


Рис. 2. Вертикальные профили нормированной мощности – $P(h)$ (сплошная тонкая с изломами), нормированной мощности после фильтрации – $\Theta_{дВ}(h)$ (сплошная толстая), нормированной мощности из решения прямой задачи радиозондирования – $P_{ДР}(h)$ (сплошная тонкая) и коэффициента поглощения ДМ-радиоволн $Z(h)$, полученные в сеансах радиозатменных измерений 17.22 UT (панели (а) и (б)) и 19.01 UT (панели (в) и (г)) 22.VI.2015 в ионосфере Земли. Справа указаны погрешности δZ восстановления профилей коэффициента поглощения $Z(h)$.

время проведения эксперимента, номера космических аппаратов. Справа указаны погрешности δZ восстановления профилей коэффициента поглощения $Z(h)$. Измерения, относящиеся к профилям на панелях (а) и (б) рис. 2, были проведены после начала мощных всплесков рентгеновских лучей (~16.30 UT 22.VI.2015) и до прихода (18.36 UT 22.VI.2015) основного КВМ (коронального выброса массы) в магнитосферу планеты. Особенностью зондирования этого района с координата-

ми 77.6° N и 66.1° E является то, что средняя мощность сигнала падает до уровня ~0.5 (–3 дБ) на высоте ~90 км и с уменьшением высоты остается на том же уровне (рис. 2а). Локальные максимумы коэффициента поглощения 2.5 ± 0.7 и 2.9 ± 0.7 дБ/км наблюдаются на высотах 92.9 и 88.6 км, соответственно (рис. 2б). Эти измерения могут быть подвержены влиянию всплесков рентгеновского излучения, а воздействие на них геомагнитных условий основной фазы шторма

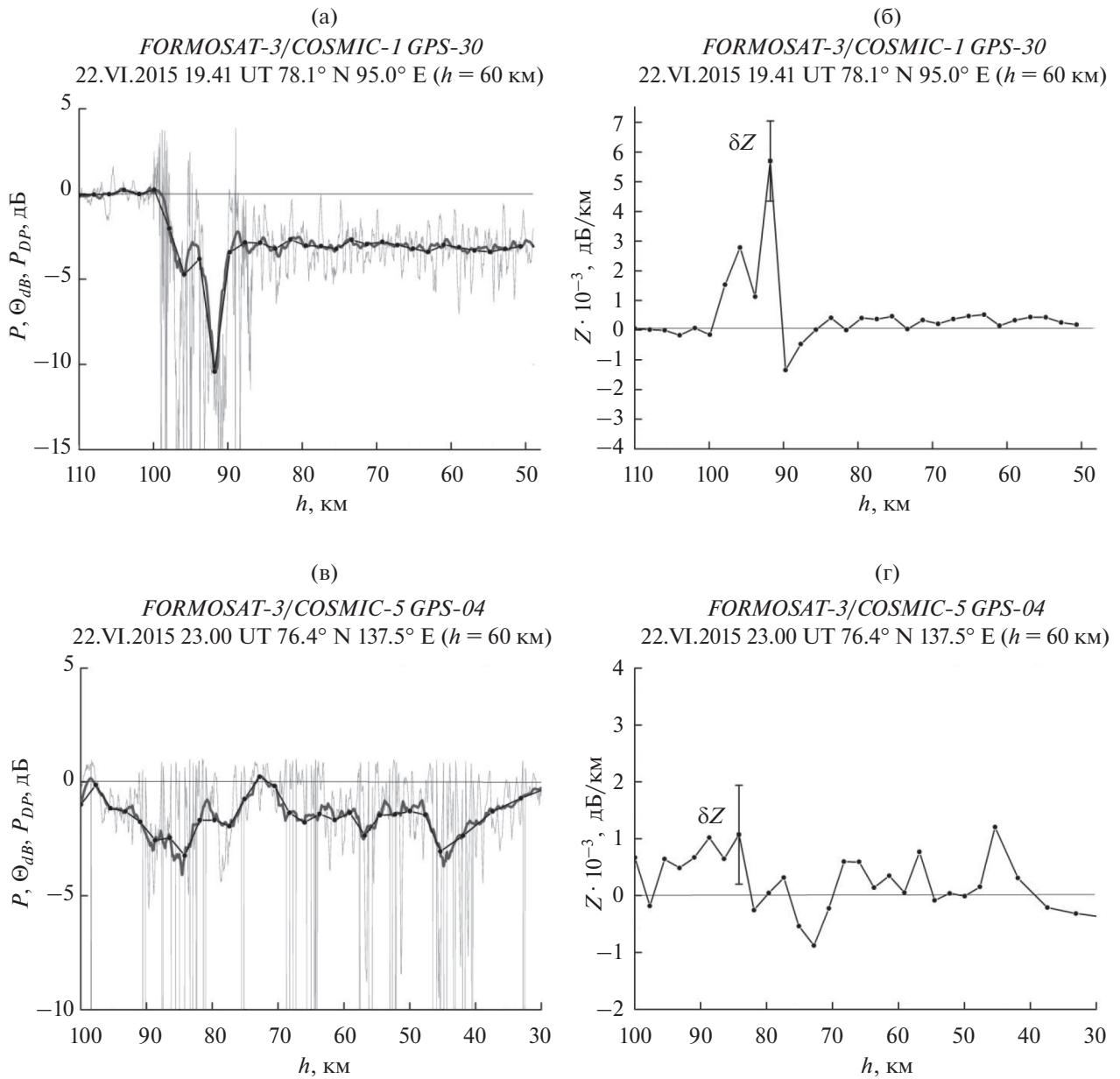


Рис. 3. Профили нормированной мощности – $P(h)$, нормированной мощности после фильтрации – $\Theta_{dB}(h)$, нормированной мощности из решения прямой задачи радиозондирования – $P_{DPP}(h)$ и коэффициента поглощения ДМ-радиоволн $Z(h)$, полученные в сеансах радиозатменных измерений 19.41 UT (панели (а) и (б)) и 23.00 UT (панели (в) и (г)) 22.VI.2015 в ионосфере планеты. Здесь обозначения такие же, как и на рис. 2.

отсутствует. Измерения, относящиеся к радиозатменным профилям на панелях (в) и (г) рис. 2, выполненные в 19.01 UT 22.VI.2015, демонстрируют сильные ионосферные возмущения, обусловленные влиянием, как основной фазы магнитной бури, так и мощных потоков рентгеновского излучения. Здесь локальный максимум коэффициента поглощения (3.3 ± 1.3 дБ/км) расположен на высоте 63.8 км (рис. 2г). В табл. 1 представлены высотные интервалы поглощения

ДМ-радиоволн в ионосфере Земли, высоты h_{max} максимумов коэффициента поглощения и значения максимумов Z_{max} для анализируемых в этой работе сеансов измерений.

Наиболее надежно поглощение сигналов ДМ-диапазона было обнаружено в радиозатменном сеансе измерений, представленном на рис. 3а и 3б. Эти измерения проведены в 19.41 UT 22.VI.2015 и они демонстрируют наиболее сильные возмущения, обусловленные как мощными всплесками

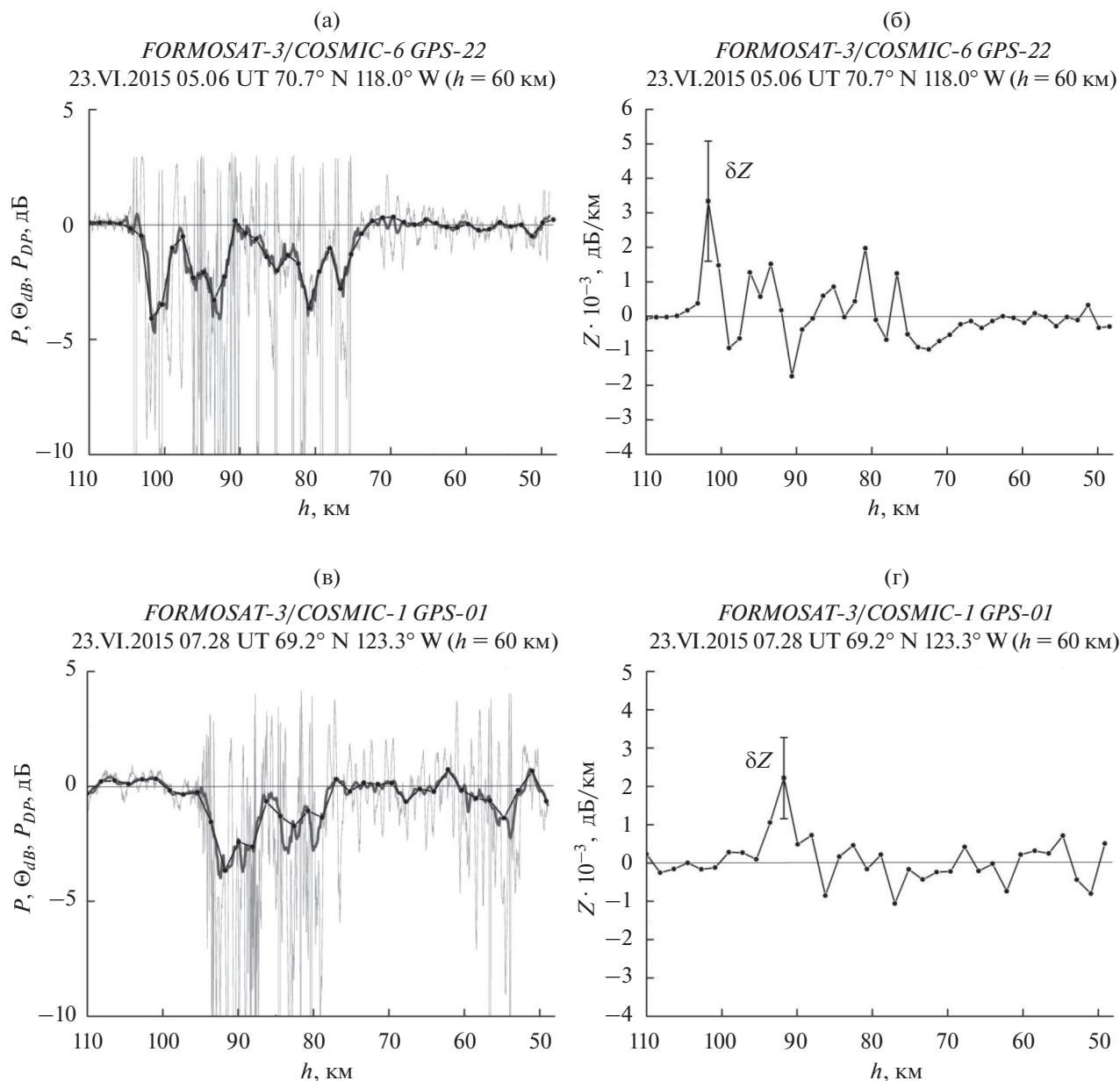


Рис. 4. Профили нормированной мощности – $P(h)$, нормированной мощности после фильтрации – $\Theta_{dB}(h)$, нормированной мощности из решения прямой задачи радиозондирования – $P_{DP}(h)$ и коэффициента поглощения ДМ-радиоволн $Z(h)$, полученные в сеансах радиозатменных измерений 05.06 UT (панели (а) и (б)) и 07.28 UT (панели (в) и (г)) 23.VI.2015 в ионосфере Земли. Обозначения такие же, как на рис. 2 и 3.

рентгеновского излучения, так и изменением геомагнитных условий во время главной фазы шторма. Как видно из представленных данных, при радиозондировании данного района (78.1° N; 95.0° E) полярной шапки Земли (луч опускается сверху вниз), сначала мощность дециметровых радиоволн понижается до уровня ~ 0.1 (–10 дБ) на высотах от 101.5 до 90.3 км, затем увеличивается до ~ 0.5 (–3 дБ), и далее продолжает оставаться на том же уровне при уменьшении высоты (рис. 3а).

Локальный максимум коэффициента поглощения в этом сеансе достигает наибольшего значения (для всех анализируемых сеансов) 5.7 ± 1.4 дБ/км и расположен на высоте 91.8 км (рис. 3б). Поглощение в радиозатменном сеансе измерений, представленном на рис. 3 (панели (в) и (г)), выражено менее ярко по сравнению с сеансами, рассмотренными выше.

На рис. 4 представлены данные о поглощении радиоволн в ионосфере Земли, полученные в се-

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

ансах радиозатменных измерений 05.06 UT (панели (а) и (б)) и 07.28 UT (панели (в) и (г)) 23.VI.2015 в ионосфере Земли. Указанные времена измерений соответствуют концу главной фазы бури (~03–05 UT 23.VI.2015) [1]. Как видно из представленных на рис. 4 данных, поглощение радиоволн наблюдается довольно четко в этих сеансах. Локальные максимумы коэффициента поглощения 3.3 ± 1.7 (рис. 4б) и 2.2 ± 1.1 дБ/км (рис. 4г) наблюдаются на высотах 101.7 и 91.8 км, соответственно.

Таким образом, нами предложен метод восстановления вертикальных профилей коэффициента поглощения 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. Надежно идентифицированы слои поглощения в радиозатменных сеансах измерений во время магнитной 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 Земли связана с обеспечением бесперебойной работы систем космической радиосвязи и навигации.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А. и др. Радиозатменные исследования возмущений в ионосфере земли во время магнитной бури 22–23.VI.2015 // Геомагнетизм и аэронавигация. 2021. Т. 61. № 6. С. 713–722. <https://doi.org/10.31857/S0016794021060067>
2. Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А. и др. Вариации параметров радиоволн в высокоширотной ионосфере Земли на трассах спутник–спутник во время геомагнитной бури 22–23.VI.2015 // Космич. исслед. 2021. Т. 59. № 3. С. 191–195. <https://doi.org/10.31857/S0023420621030055>
3. Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Kirillovich I.A., Liou Y.-A. Case study of inclined sporadic E layers in the Earth's ionosphere observed by CHAMP/GPS radio occultations: Coupling between the tilted plasma layers and internal waves // Advances in Space Research. 2018. V. 61. № 7. P. 1702–1716. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.001>
4. Губенко В.Н., Кириллович И.А. Модуляция спорадических E-слоев мелкомасштабными атмосферными волнами в высокоширотной ионосфере Земли // Солнечно-земная физика. Т. 5. № 3. С. 116–129. <https://doi.org/10.12737/szf-53201912>
5. Liou Y.-A., Pavelyev A.G., Liu S.-F. et al. FORMOSAT-3/COSMIC GPS radio occultation mission: preliminary results // IEEE T. Geosci. Remote. 2007. V. 45. P. 3813–3826.
6. Pavelyev A.G., Liou Y.A., Wickert J. et al. New Applications and Advances of the GPS Radio Occultation Technology as Recovered by Analysis of the FORMO-

- SAT-3/COSMIC and CHAMP Data-Base / Eds. Steiner A., Pirscher B., Foelsche U., Kirchengast G. Springer-Verlag, Berlin. 2009. P. 165–178.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-00321_9
7. Pavelyev A.G., Liou Y.-A., Zhang K. et al. Identification and localization of layers in the ionosphere using the eikonal and amplitude of radio occultation signals // Atmos. Meas. Tech. 2012. V. 5. P. 1–16.
<https://doi.org/10.5194/amt-5-1-2012>
 8. Pavelyev A.G., Liou Y.-A., Matyugov S.S. et al. Application of the locality principle to radio occultation studies of the Earth's atmosphere and ionosphere // Atmos. Meas. Tech. 2015. V. 8. P. 2885–2899.
<https://doi.org/10.5194/amt-8-2885-2015>
 9. Wickert J., Pavelyev A.G., Liou Y.A. et al. Amplitude scintillations in GPS signals as a possible indicator of ionospheric structures // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. L24801.
<https://doi.org/10.1029/2004GL020607>
 10. Горбунов М.Е. Физические и математические принципы спутникового радиозатменного зондирования атмосферы Земли. М.: ГЕОС, 2019.
 11. Andreev V.E., Gubenko V.N., Pavelyev A.A. et al. Absorption of decimetre radio waves in the Earth's high-latitude ionosphere during a geomagnetic storm in June 2015 // J. Physics: Conference Series. 2020. V. 1632. P. 012008.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1632/1/012008>