

**Эффективная частота столкновений электронов в
E и D областях высокоширотной ионосферы
Земли по данным анализа радиозатменных
измерений**

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

*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»**

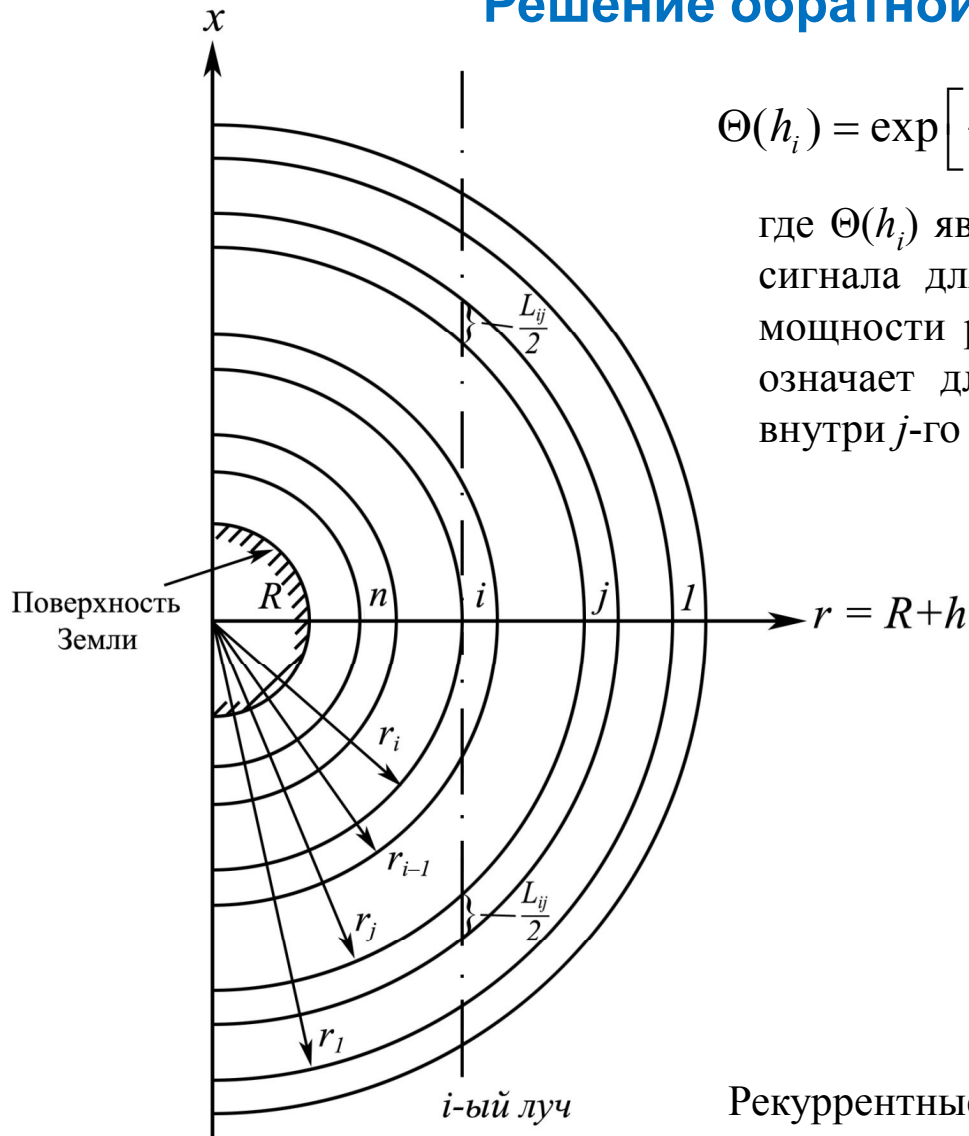
13 - 17 ноября 2023 года, ИКИ РАН, Москва

Введение: Изучение столкновений между электронами и нейтральными молекулами представляет особый интерес для физики ионосферы Земли, в частности, с точки зрения определения ионосферной проводимости и токовых систем в нижней ионосфере планеты и выяснения роли, которую эти столкновения играют в ослаблении радиоволн, распространяющихся внутри *D*- и *E*-областей ионосферы. Эффективную частоту столкновений электронов ν можно оценить по лабораторным исследованиям подвижности электронов в атмосферных газах в сочетании с ракетными измерениями температуры и плотности частиц в верхней атмосфере Земли (Belrose, *Physics of the Earth's Upper Atmosphere*, 1965), также её можно определить независимо из анализа радиозатменных данных. Ранее, нами был разработан метод восстановления вертикальных профилей коэффициента поглощения дециметровых (длина волны ~ 19 см) радиоволн, базирующийся на решении обратной задачи о поглощении сигнала в *D*- и *E*-областях ионосферы Земли. По результатам анализа радиозатменных данных спутников *FORMOSAT-3/COSMIC* были определены высотные профили коэффициента поглощения дециметровых (ДМ) радиоволн в ионосфере планеты во время магнитной бури в июне 2015 года (Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2022; Andreev et al., *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021).

Найдено, что во время бури на ионосферных высотах от ~90 до ~100 км максимальная величина коэффициента поглощения ДМ-радиоволн достигала значений $(5.7 \pm 1.4) \cdot 10^{-3}$ дБ/км (Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2022). Известно, что величина коэффициента поглощения на данной фиксированной частоте прямо пропорциональна произведению электронной плотности и частоты столкновений электронов с ионами и нейтралами (Брюнелли, Намгаладзе, *Физика ионосферы*, 1988; Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2021; Gubenko et al., *Geomagn. Aeron.*, 2021). Используя полученные данные о вертикальных профилях коэффициента поглощения ДМ-радиоволн и электронной плотности, восстановленных из анализа радиозатменных данных *FORMOSAT-3/COSMIC*, мы оценили эффективную частоту столкновений электронов в *D*- и *E*-областях высокоширотной ионосферы Земли (Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2023). В докладе обсуждаются критерии отбора профилей коэффициента поглощения и электронной плотности для расчета эффективной частоты столкновений электронов, а также границы применимости радиозатменного метода при определении ν . Практическая значимость изучения эффективной частоты столкновений электронов и 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.

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.

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

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

$$\dots$$

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

$$\dots$$

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.

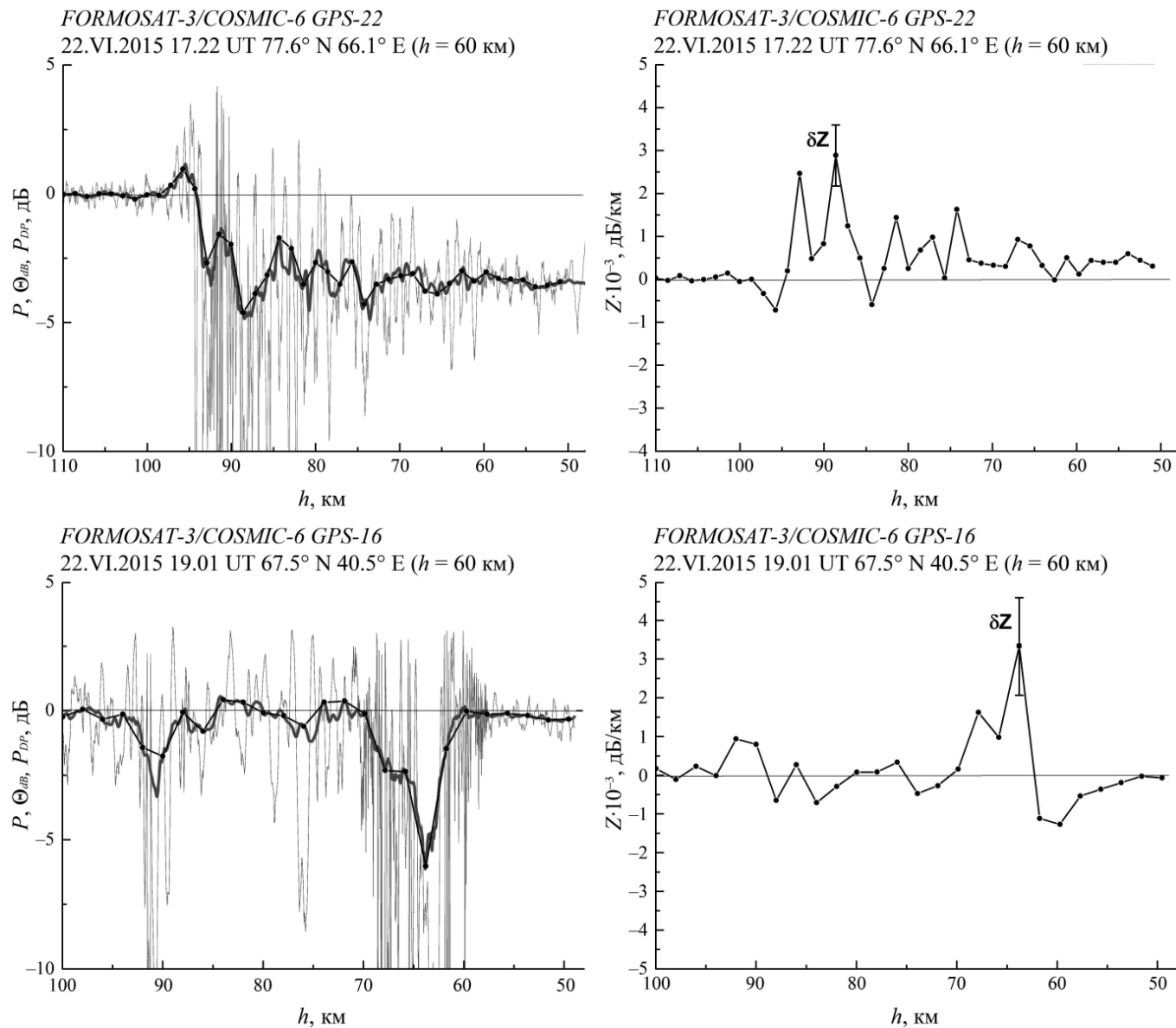


Рис. 2. Вертикальные профили нормированной мощности – $P(h)$ (сплошная тонкая с изломами), нормированной мощности после фильтрации – $\Theta_{dB}(h)$ (сплошная толстая), нормированной мощности из решения прямой задачи радиозондирования – $P_{DR}(h)$ (сплошная тонкая) и коэффициента поглощения ДМ-радиоволн $Z(h)$, 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).

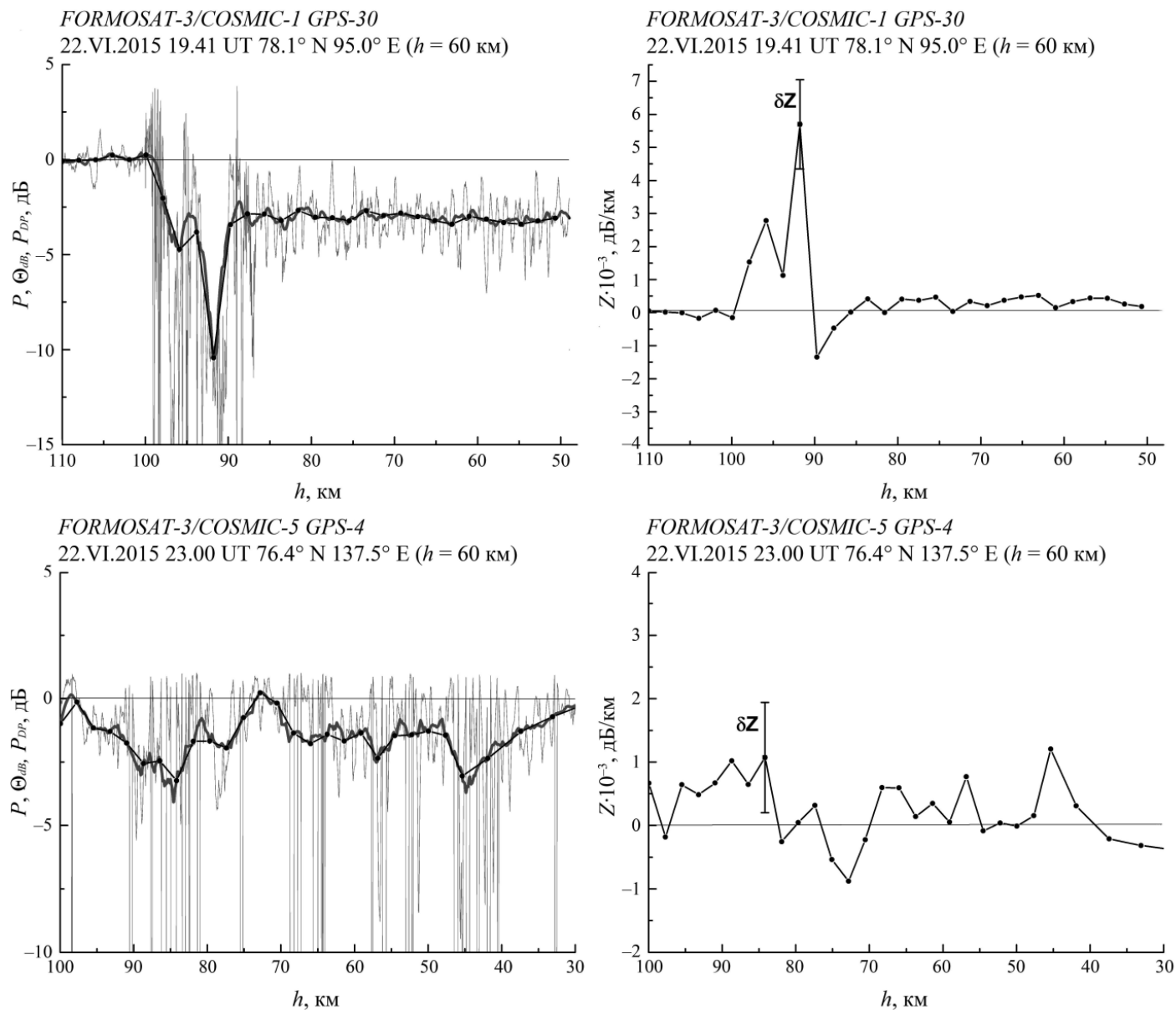


Рис. 3. Профили нормированной мощности – $P(h)$, нормированной мощности после фильтрации – $\Theta_{AB}(h)$, нормированной мощности из решения прямой задачи радиозондирования – $P_{DP}(h)$ и коэффициента поглощения ДМ-радиоволн $Z(h)$, полученные в сеансах радиозатменных измерений 19.41 UT (верхняя панель) 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).

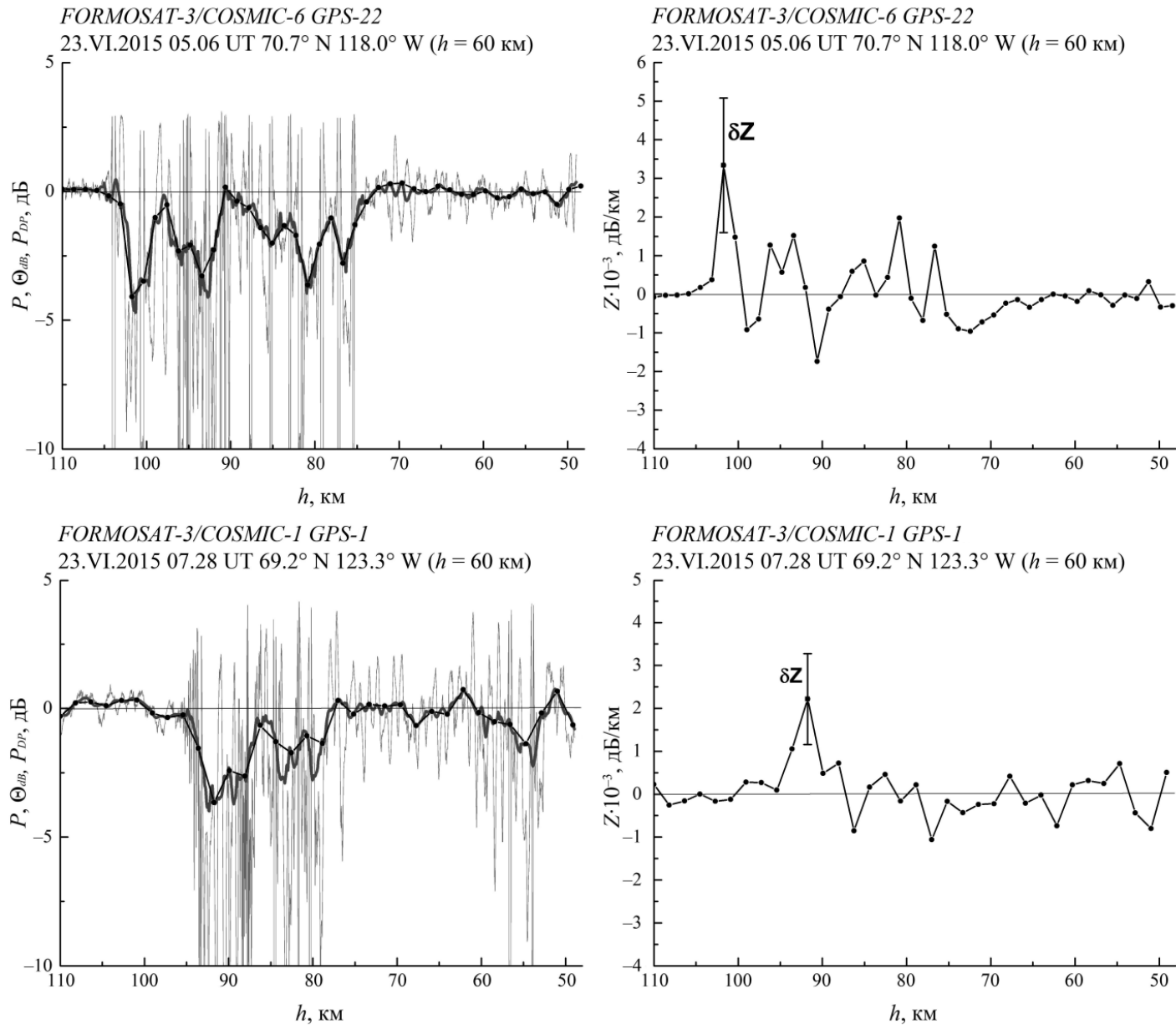


Рис. 4. Профили нормированной мощности – $P(h)$, нормированной мощности после фильтрации – $\Theta_{dB}(h)$, нормированной мощности из решения прямой задачи радиозондирования – $P_{DP}(h)$ и коэффициента поглощения ДМ-радиоволн $Z(h)$, полученные в сеансах радиозатменных измерений 05.06 UT (верхняя панель)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

Метод определения эффективной частоты соударения электронов

Если частота радиоволн $\omega = 2\pi f$ удовлетворяет неравенству $\omega^2 \gg \nu^2$, то эффективную частоту столкновений электронов ν можно определить согласно выражению (Брюнелли, Намгаладзе, *Физика ионосферы*, 1988):

$$Z(h) = 1.15 \cdot 10^3 \frac{N_e(h) \cdot \nu(h)}{f^2}, \quad (1)$$

где электронная плотность N_e выражена в см^{-3} , эффективная частота столкновений ν – в с^{-1} , частота f – в Гц и коэффициент поглощения радиоволн Z – в дБ/км.

Согласно выражению (1), формула для восстановления профиля $\nu(h)$ из данных о коэффициенте поглощения $Z(h)$ на несущей GPS-частоте $f_1 = 1.54542 \cdot 10^9$ Гц и о профиле электронной плотности $N_e(h)$ имеет вид:

$$\nu(h) \approx \frac{Z(h) f_1^2}{1.15 \cdot 10^3 N_e(h)}. \quad (2)$$

Учитывая ошибки $\delta Z/Z$ и $\delta N_e/N_e$ при определении коэффициента поглощения Z и электронной плотности N_e , можно найти относительную погрешность восстановления $\delta \nu/\nu$ эффективной частоты столкновений электронов:

$$\delta \nu / \nu = \sqrt{(\delta Z/Z)^2 + (\delta N_e/N_e)^2}. \quad (3)$$

Критерий отбора профиля $Z(h)$ для расчёта эффективной частоты столкновений электронов с нейтрами и ионами состоит в следующем:

а) отбирались профили $Z(h)$, у которых локальные максимумы коэффициента поглощения были восстановлены с относительной погрешностью не более $\delta Z/Z \approx 50\%$ (см. табл. 1 работы Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2022);

б) для рассматриваемого сеанса радиозатменных измерений должны иметься данные об электронной плотности в анализируемом интервале высот.

Что касается применимости радиозатменного метода для определения ν , то ответ зависит, в основном, от того, насколько хорошо и с какими погрешностями восстанавливаются значения локальных максимумов Z_{max} в высотных профилях коэффициента поглощения $Z(h)$. Именно от этих погрешностей, главным образом, зависят ошибки определения ν , поскольку влиянием погрешностей восстановления электронной плотности ($\sim 10\%$) можно в данном случае пренебречь.

До настоящего времени радиозатменные измерения не использовались для исследования поглощения радиоволн на GPS-частотах и определения частоты столкновений электронов 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 радиоволн (Gubenko et al., *Geomagn. Aeron.*, 2021). Проведенный анализ радиозатменных сеансов измерений во время бури в июне 2015 года продемонстрировал надёжно идентифицированные слои повышенного поглощения, обусловленные мощными всплесками рентгеновского излучения и сильными изменениями геомагнитных условий (Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2022).

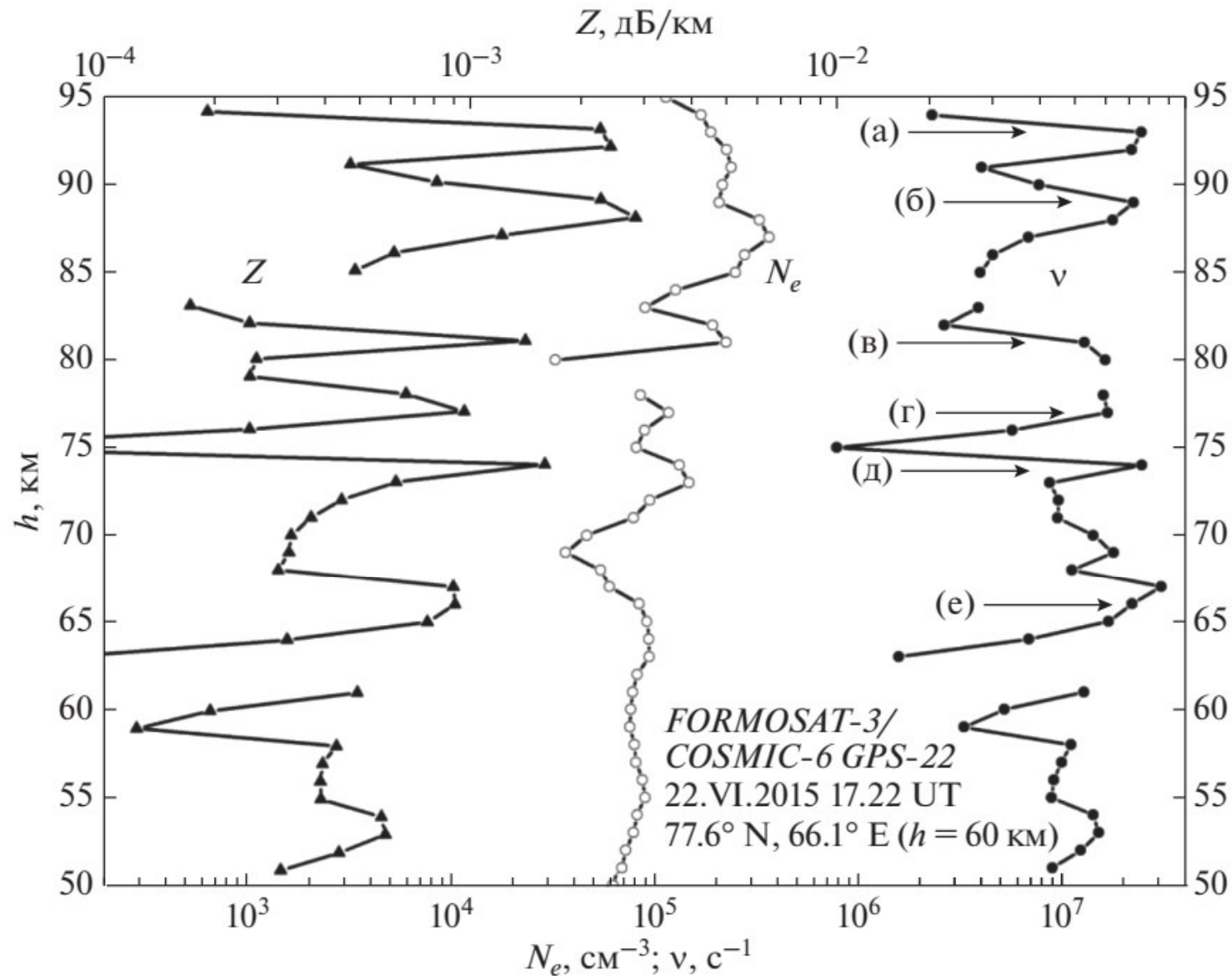


Рис. 5. Вертикальные профили коэффициента поглощения $Z(h)$ радиоволн, электронной плотности $N_e(h)$ и эффективной частоты столкновений электронов $\nu(h)$ в ионосфере Земли, полученные из анализа сеанса радиозатменных измерений *FORMOSAT-3/COSMIC-6 GPS-22* (22.VI.2015). Величины относительной погрешности $\delta\nu/\nu$ для выделенных экспериментальных точек: ~28% (а); ~25% (б); ~50% (в); ~71% (г); ~45% (д); ~75% (е) (Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2023).

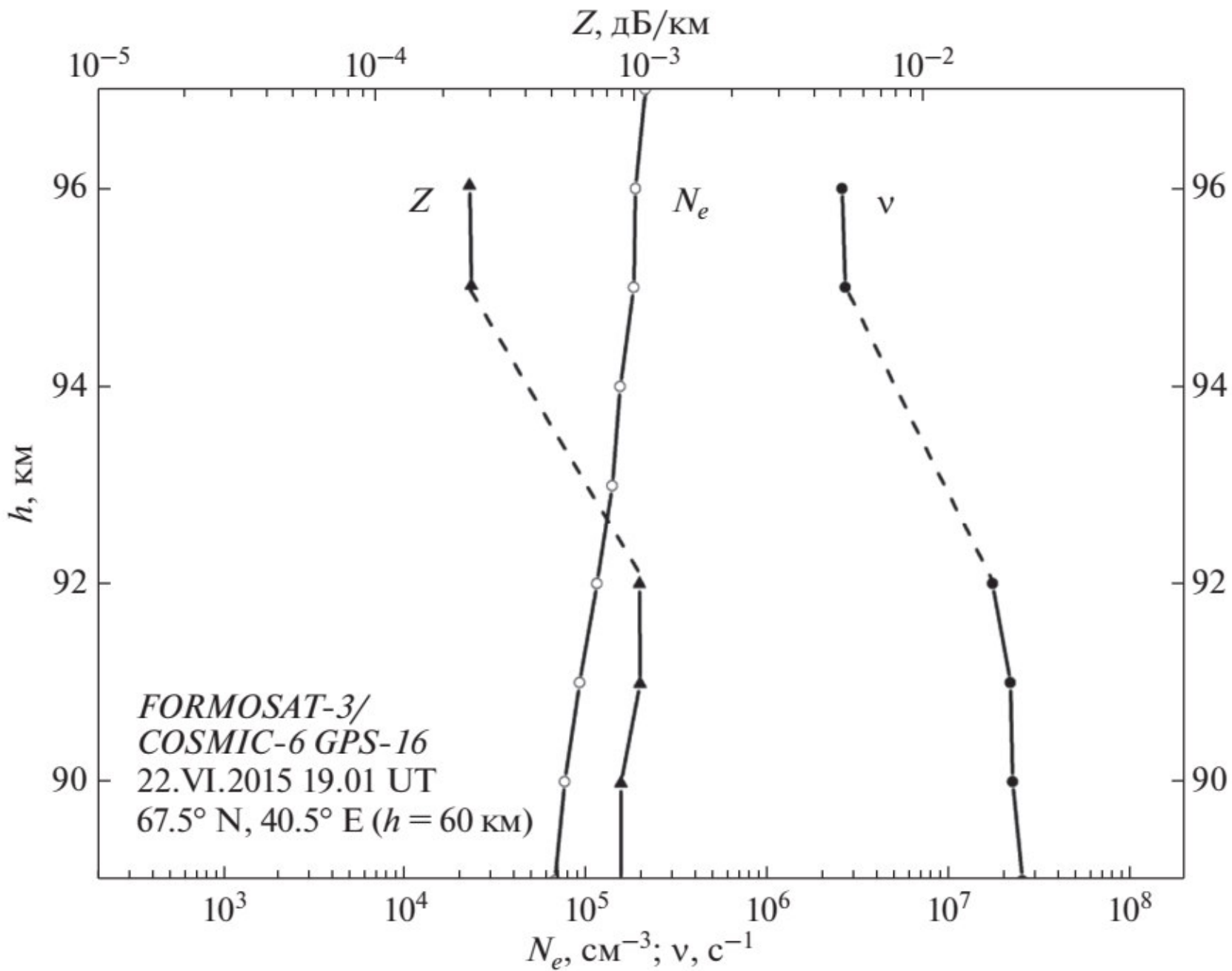


Рис. 6. То же, что и на рис. 5, но для сеанса измерений *FORMOSAT-3/COSMIC-6 GPS-16* (22.VI.2015) (Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2023).

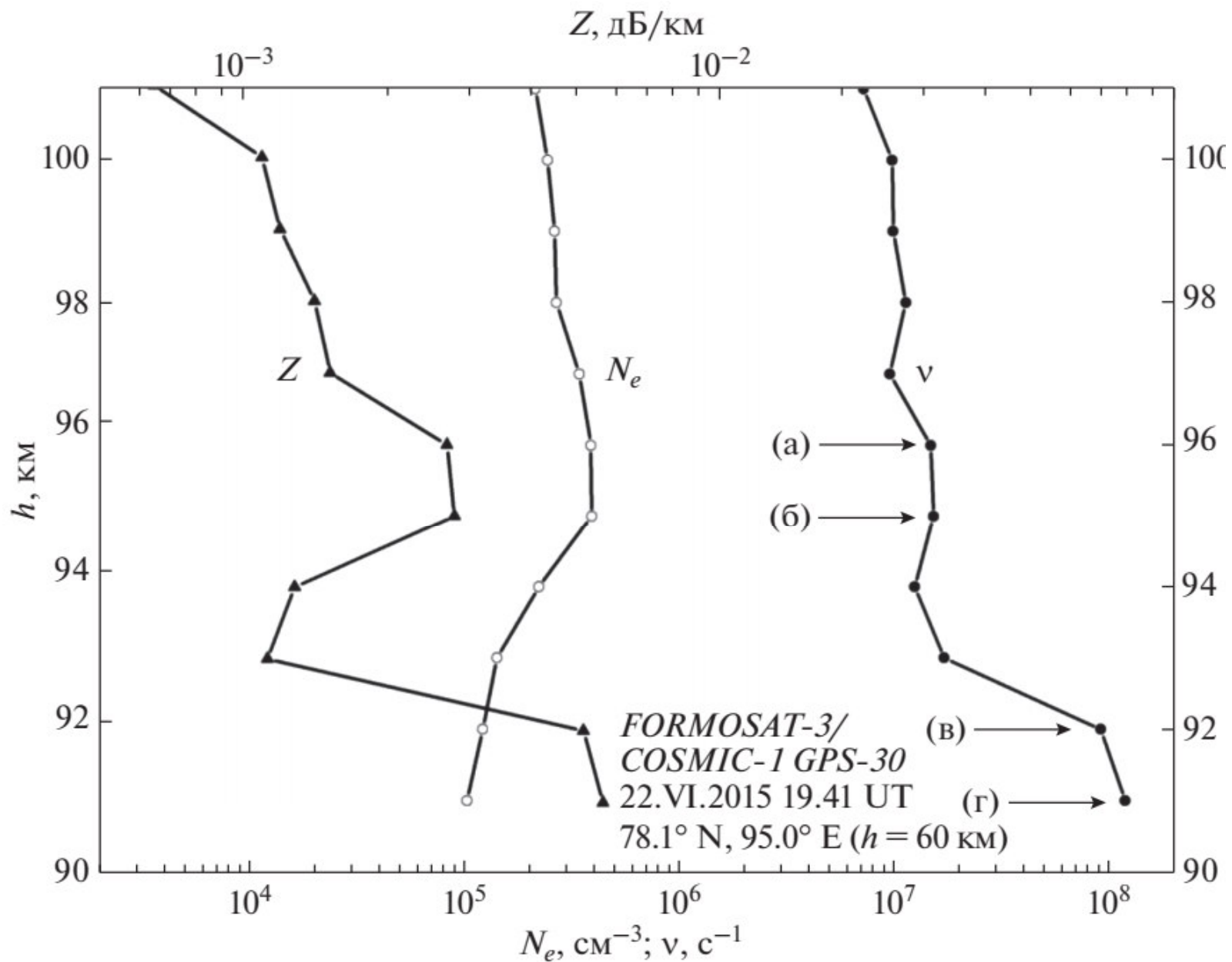


Рис. 7. То же, что и на рис. 5, но для сеанса измерений *FORMOSAT-3/COSMIC-1 GPS-30* (22.VI.2015). Величины относительной погрешности $\delta v/v$ для выделенных экспериментальных точек: ~50% (а); ~50% (б); ~27% (в); ~26% (г) (Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2023).

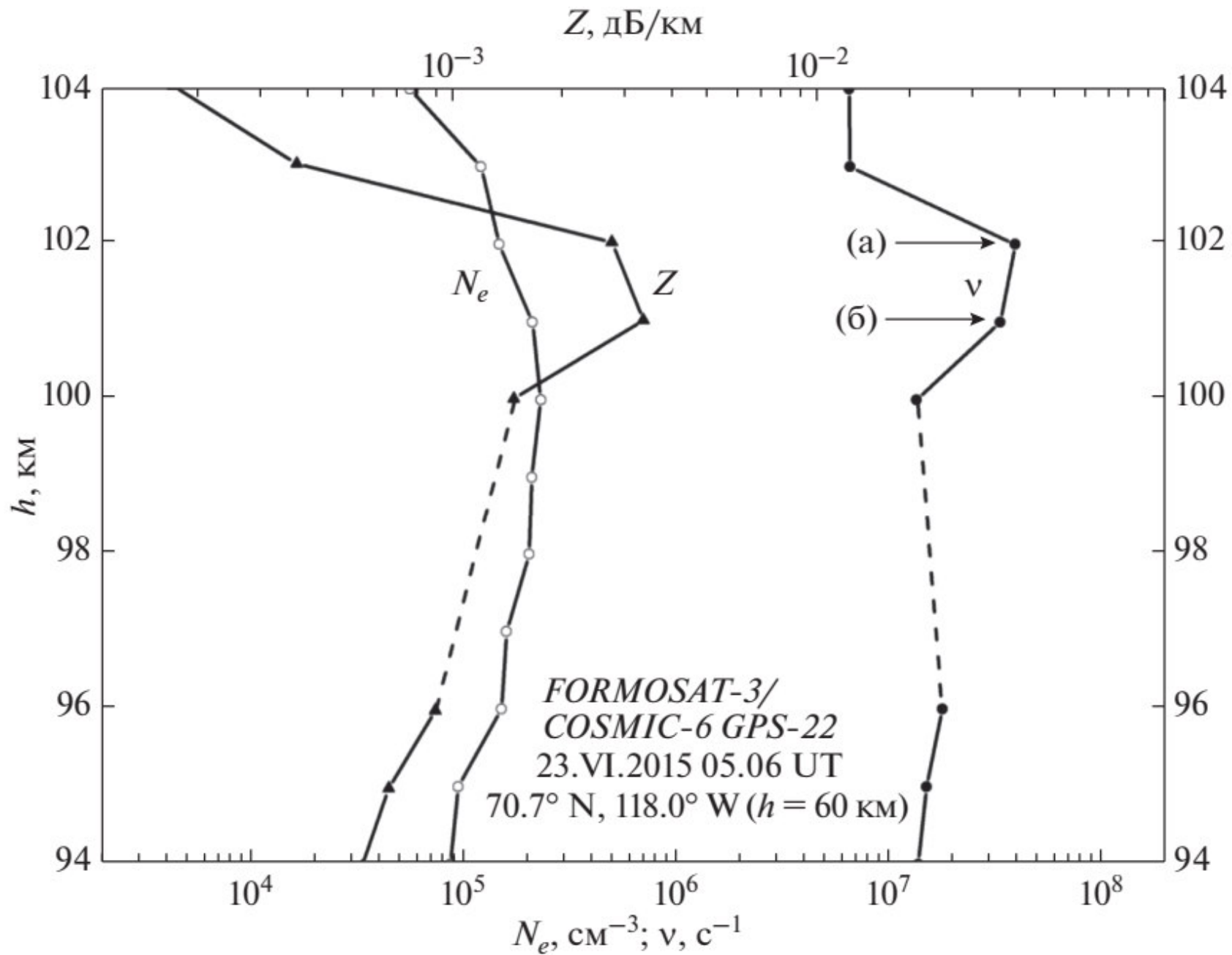


Рис. 8. То же, что и на рис. 5, но для сеанса измерений *FORMOSAT-3/COSMIC-6 GPS-22* (23.VI.2015). Величины $\delta v/v$ для выделенных экспериментальных точек: ~53% (а); ~52% (б) (Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2023).

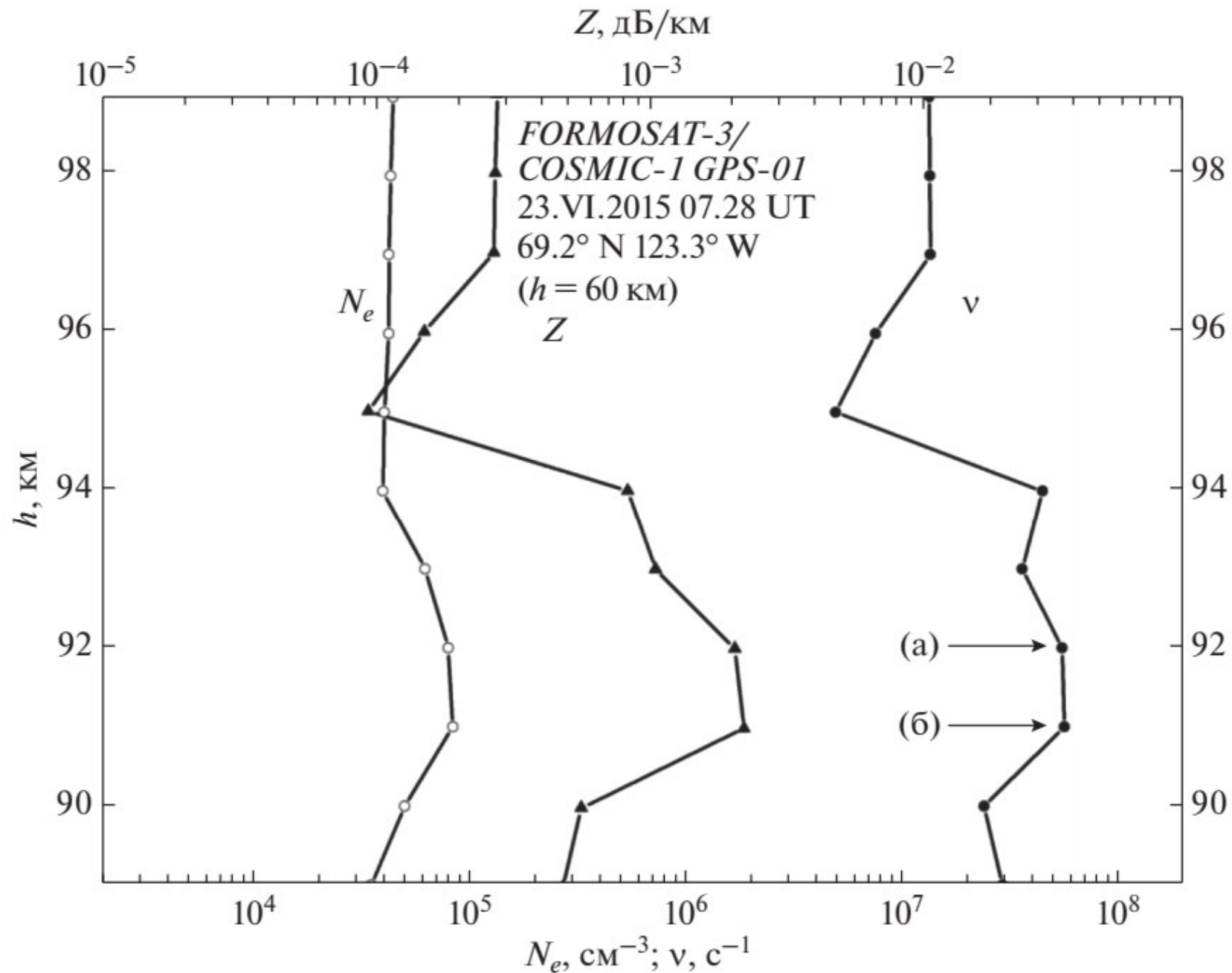


Рис. 9. То же, что и на рис. 5, но для сеанса измерений *FORMOSAT-3/COSMIC-1 GPS-01* (23.VI.2015). Величины $\delta\nu/\nu$ для выделенных экспериментальных точек: $\sim 52\%$ (а); $\sim 52\%$ (б) (Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2023).

Заключение:

По результатам анализа радиозатменных данных разработан метод восстановления вертикальных профилей эффективной частоты столкновения электронов в *D*- и *E*-областях ионосферы Земли. С использованием данных о вертикальных профилях коэффициента поглощения ДМ-радиоволн и электронной плотности, восстановленных из анализа радиозатменных измерений *FORMOSAT-3/COSMIC*, оценена эффективная частота столкновений электронов в *D*- и *E*-областях высокоширотной ионосферы Земли во время магнитной бури 22–23.VI.2015. Практическая значимость изучения частоты столкновений электронов и 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.

Литература:

- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 518 с. 1988.
- 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: 10.1S088/1742-6596/1991/1/012006.
- Belrose, J.S. The Lower Ionospheric Regions, in Physics of the Earth's Upper Atmosphere, Hines, C.O., Paghis, I., Hartz, T.R., Fejer, J.A., Eds., Englewood Cliffs: Prentice-Hall Inc., 1965, pp. 46–72.
- 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.
- Gubenko V.N., Andreev V.E., Kirillovich I.A., Gubenko T.V., Pavelyev A.A., Gubenko D.V. Determination of the Effective Collision Frequency of Electrons in the E and D Regions of the High-Latitude Ionosphere from Analysis of Radio-Occultation Measurements // Cosmic Research. 2023. V. 61. No. 6. P. 454–460, doi: 10.1134/S0010952523700491.

Спасибо за внимание!