

Поглощение дециметровых радиоволн ( $\lambda \sim 19$  см)  
в высокоширотной ионосфере Земли во время  
геомагнитной бури 22–23 июня 2015 года  
**(РФФИ № 19-02-00083 А)**

*Губенко В.Н., Кириллович И.А., Губенко Т.В.,  
Андреев В.Е., Губенко Д.В., Павельев А.А.*

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Фрязинский филиал (ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), пл. акад. Б.А.  
Введенского, дом 1, 141190 Фрязино, Московская обл., Россия*

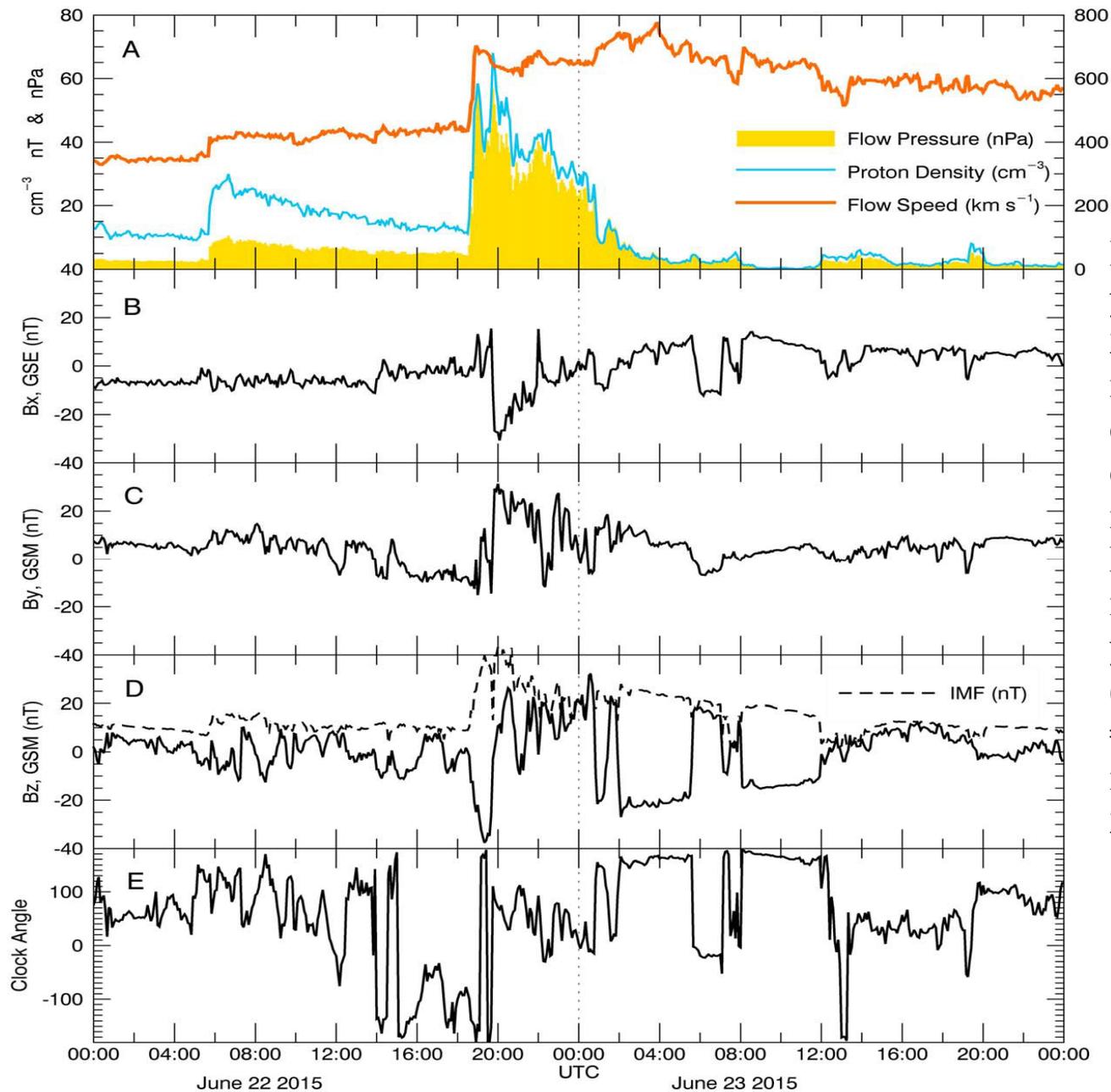
*e-mail: [vngubenko@gmail.com](mailto:vngubenko@gmail.com)*

**Восемнадцатая Всероссийская Открытая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ  
ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА  
(Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей  
среды, потенциально опасных явлений и объектов)»**

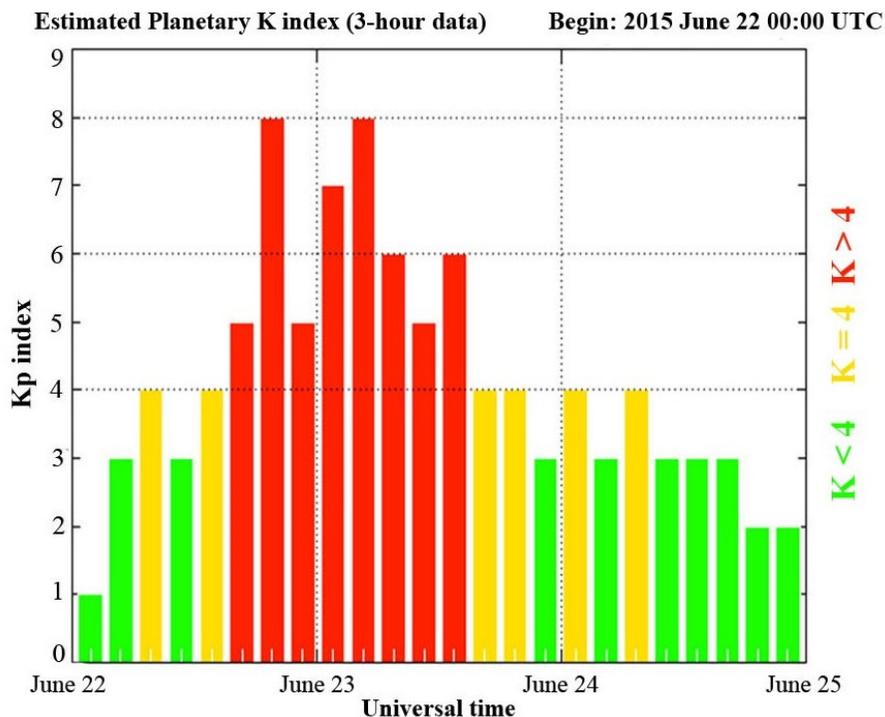
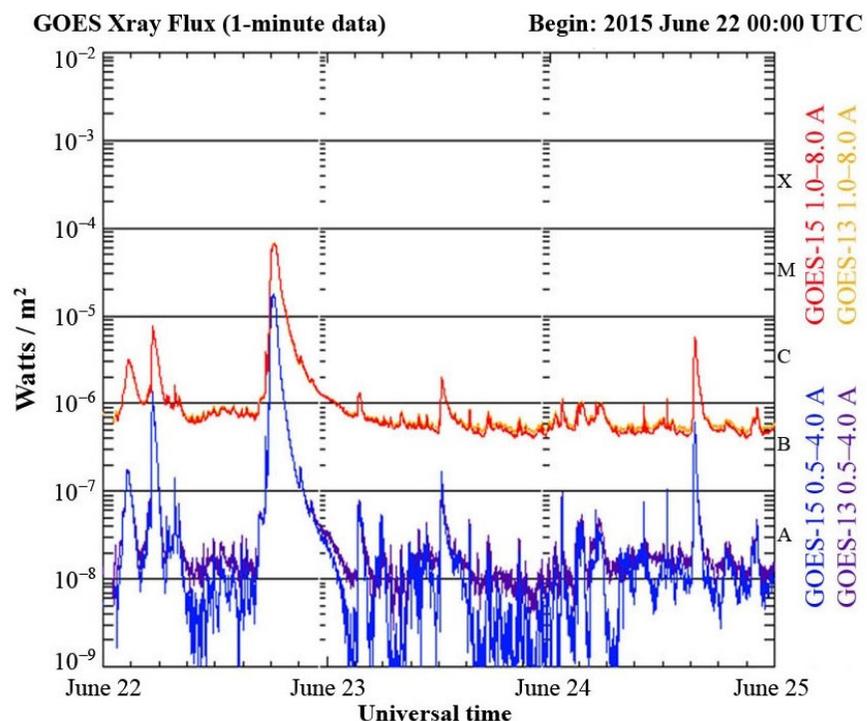
**16 - 20 ноября 2020 года, ИКИ РАН, Москва**

**Введение:** Летом 2015 года на Солнце имели место корональные выбросы массы (КВМ) в сторону Земли (один гигантский и несколько небольших выбросов). Данное событие было зафиксировано многими космическими аппаратами и ионосферными станциями. Корональные выбросы плазмы, дошедшие до Земли в период с 22 по 23 июня 2015 года, спровоцировали магнитную бурю класса *G4* (сильный геомагнитный шторм, планетарный *Kp*-индекс равен 8), которая в свою очередь вызвала значительные ионосферные флуктуации параметров радиосигналов на трассах зондирования: навигационные (*GPS*) спутники – низкоорбитальные (*FORMOSAT-3/COSMIC*) спутники. Мощные рентгеновские вспышки, наблюдавшиеся на Солнце в период геомагнитного шторма, также обуславливали возмущения волновых характеристик во время радиозатменных измерений в ионосфере Земли.

**Цель работы:** анализ радиозатменных измерений *FORMOSAT-3/COSMIC* и проведение поиска поглощения дециметровых радиоволн на несущей *GPS*-частоте  $f_1=1545,42$  МГц (диапазон *L1*, длина волны  $\sim 19$  см) в интервале высот  $\sim 50$ – $110$  км высокоширотной ионосферы Земли во время геомагнитной бури 22–23 июня 2015 года.



**Рис. 1.** Геомагнитные условия во время бури 22–23 июня 2015 года: (A) плотность протонов, скорость и давление солнечного ветра; (B–D) компоненты вектора IMF  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  (величина  $|\mathbf{B}|$  показана пунктиром); (E) угол вектора IMF (направления компонент:  $0 = +B_z$ ;  $90 = +B_y$ ) (рисунок взят из работы [Reiff et al., 2016]).



Updated 2015 June 24 23:59 UTC

NOAA/SWPC Boulder, CO USA

Updated 2015 June 25 00:30 UTC

NOAA/SWPC Boulder, CO USA

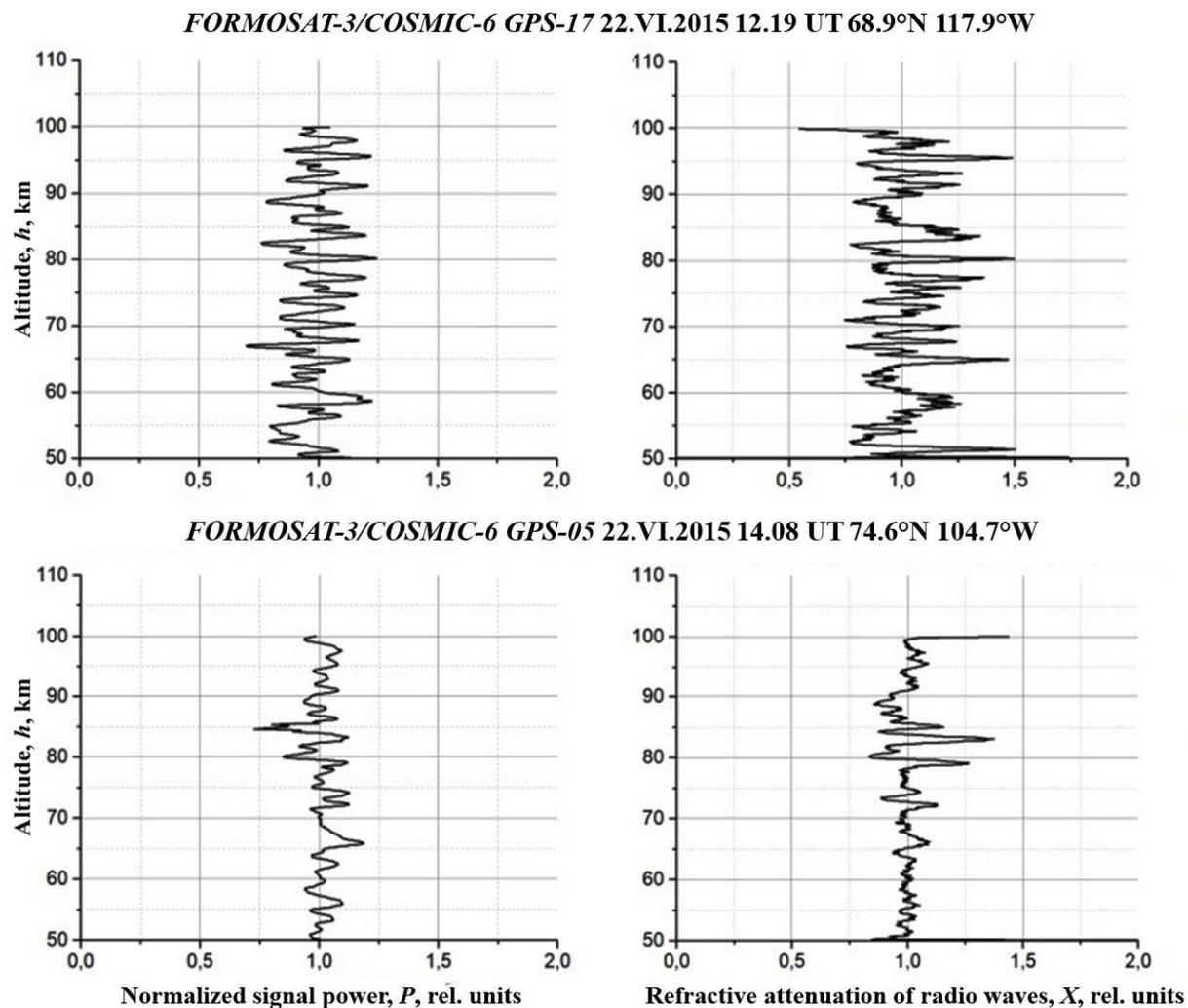
**Рис. 2.** Поток рентгеновского излучения (левая панель), зарегистрированные 22–23 июня 2015 года космическими аппаратами *GOES*-13 и -15, находящимися на геостационарной орбите и оценки планетарного *Kp*-индекса (правая панель) [URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/>]

Наиболее интенсивный выброс был идентифицирован магнитометром, как скачок межпланетного магнитного поля (IMF) от  $\sim 10$  до  $\sim 40$  нТл, а также отмечен инструментом SWEPAM (Solar Wind Electron, Proton, and Alpha Monitor), как внезапное повышение плотности протонов с  $\sim 20$  до  $\sim 45$  частиц/см<sup>3</sup> с соответствующим увеличением давления до значений выше 50 нПа. Столкновение наиболее мощного (главного) выброса с ударной волной имело место 22 июня 2015 года в  $\sim 18.36$  UT, после более слабого толчка в  $\sim 05.40$  UT [Reiff et al., 2016]. Приход главного выброса в  $\sim 18.36$  UT практически совпадал по времени с мощным всплеском рентгеновских лучей ( $\sim 18:00$  UT 22 июня – время максимума потока рентгеновских лучей), вызванных вспышками на Солнце.

## Выражения для определения рефракционного ослабления ( $X$ ) мощности радиоволн

$$\begin{aligned}1 - X(t) &= ma_{\psi} = m \cdot d^2\psi/dt^2, \\ m &= r_{\psi}/(dp_0/dt)^2, \\ r_{\psi} &= L_L \cdot L_G / L_0,\end{aligned}$$

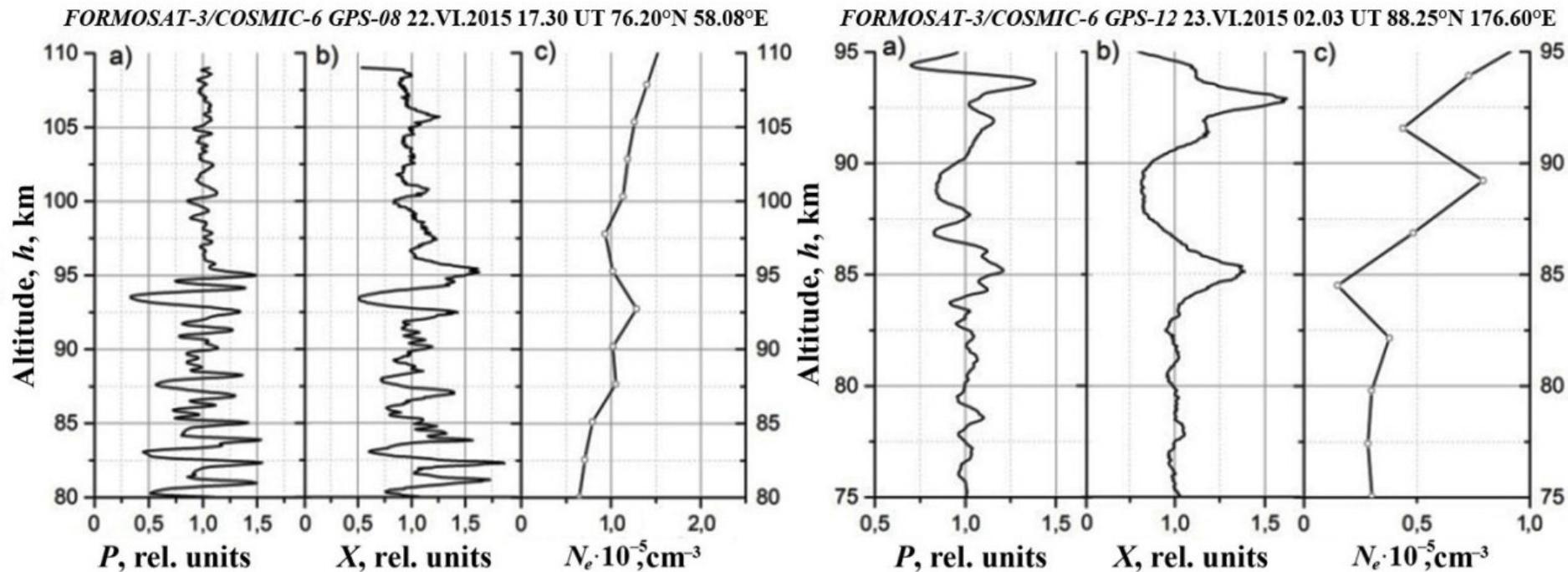
где  $p_0$  – прицельный параметр радиолуча,  $L_L$  и  $L_G$  – соответственно расстояния от приемника ( $L$ ) и передатчика ( $G$ ) до точки перигея луча,  $L_0$  – расстояние от передатчика до приёмника по прямой [Яковлев и др., 2014].



Первый интервал от **00:00 UT** до **16:30 UT** 22 июня является **спокойным геомагнитным периодом** перед началом мощных рентгеновских всплесков, начинающихся в  $\sim 16:30$  UT (Рис. 2), и перед приходом главного выброса в  $\sim 18:36$  UT 22 июня.

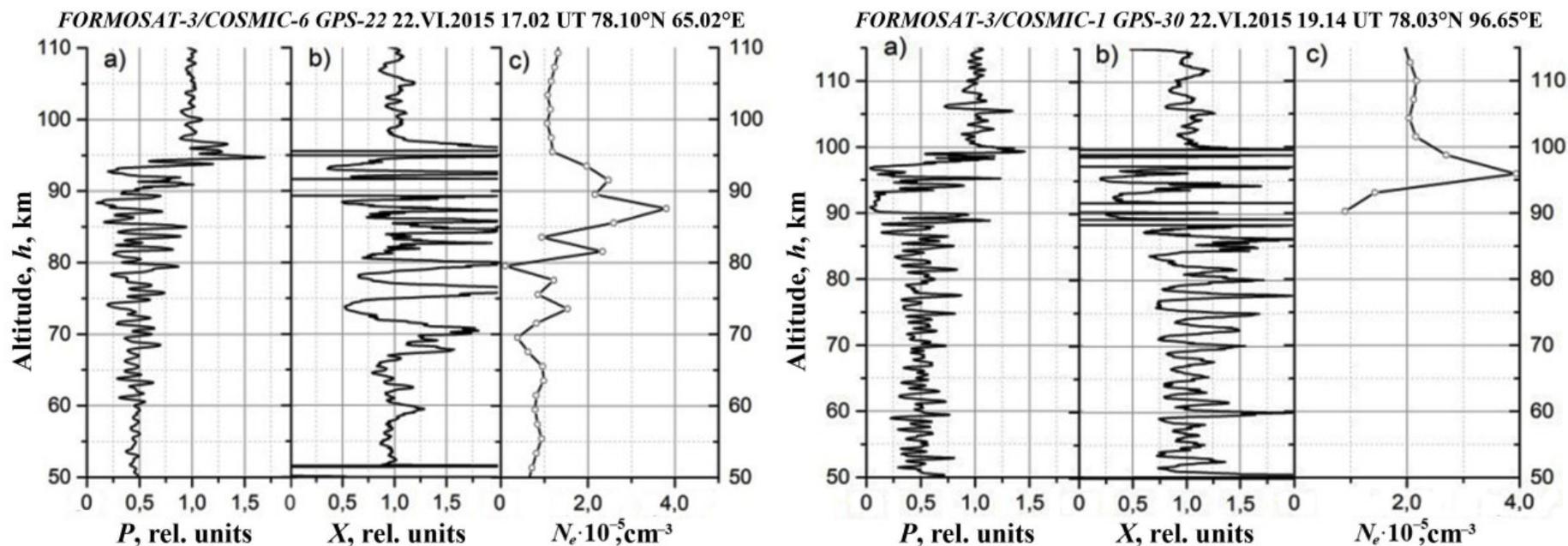
Значения **S4-индекса** для всех  $P(h)$ -профилей, заключенных внутри первого интервала, малы и не превосходят 20%.

**Рис. 3.** Высотные профили нормированной мощности сигнала ( $P$ ), измеренные в первом интервале (**спокойный геомагнитный период**) накануне геомагнитной бури **22 июня** 2015 года спутником *FORMOSAT-3/COSMIC-6*, и рефракционного ослабления радиоволн ( $X$ ), восстановленные из измерений эйконала. Значения **S4-индекса** для анализируемых профилей  $P(h)$  равны  $\sim 18\%$  (верхняя панель) и  $10\%$  (нижняя панель).



**Рис. 4.** Высотные зависимости нормированной мощности –  $P(h)$ , рефракционного ослабления –  $X(h)$  и электронной концентрации –  $N_e(h)$ , полученные по радиозатменным данным спутника *FORMOSAT-3/COSMIC-6* 22.06.2015 в 17.30 UT в ионосферном районе с координатами 76.2°N; 58.08°E (слева, второй интервал) и 23.06.2015 в 02.03 UT в районе с координатами 88.25°N; 176.6°E (справа, третий интервал).

Измерения, связанные с профилем в левой стороне рисунка были выполнены в временном подынтервале (от ~16:30 UT до ~18:36 UT 22 июня) **второго интервала** после начала в ~16:30 UT сильных всплесков рентгеновских лучей и перед приходом главного выброса в ~18:36 UT. **Второй интервал** с 16:30 UT 22 июня по 02:00 UT 23 июня является периодом мощных ионосферных возмущений, обусловленных воздействием основной фазы геомагнитного шторма и/или мощных потоков рентгеновских лучей. **Третий интервал**, включающий временной период с 02:00 по 24:00 UT 23 июня, также является спокойным геомагнитным периодом без интенсивных ионосферных возмущений, хотя величины планетарного  $Kp$ -индекса для этого периода были значительными.



**Рис. 5.** Высотные зависимости нормированной мощности –  $P(h)$ , рефракционного ослабления –  $X(h)$  и электронной концентрации –  $N_e(h)$ , полученные по радиозатменным данным *FORMOSAT-3/COSMIC* 22.06.2015 в 17.02 UT в ионосферном районе с координатами 78.1°N; 65.02°E (слева, второй интервал) и 22.06.2015 в 19.14 UT в районе с координатами 78.03°N; 96.65°E (справа, второй интервал).

Измерения, связанные с профилем в левой стороне Рис. 5, были выполнены в временном подынтервале от ~16:30 UT до ~18:36 UT 22 июня второго интервала после начала сильных всплесков рентгеновских лучей и перед приходом главного выброса. Тут возмущения параметров радиоволн связаны с всплесками рентгеновских лучей.

Измерения, связанные с профилем в правой стороне Рис. 5, были выполнены во втором интервале и здесь ионосферные возмущения обусловлены как главной фазой геомагнитного шторма, так и мощными потоками рентгеновских лучей.

## Заключение

По данным анализа радиозатменных измерений *FORMOSAT-3/COSMIC* проведен поиск поглощения дециметровых радиоволн на несущей *GPS*-частоте 1545,42 МГц (диапазон *L1*, длина волны  $\sim 19$  см) и определены мелкомасштабные структуры в высокоширотной ионосфере Земли во время геомагнитной бури 22–23 июня 2015 года. Показано, что возмущения характеристик радиоволн в большой степени обусловлены как геомагнитными условиями, так и активностью мощных рентгеновских вспышек во время радиозатменных измерений.

По результатам анализа данных *FORMOSAT-3/COSMIC*, впервые обнаружено интегральное поглощение радиоволн дециметрового диапазона *L1* в *D*- и *E*-областях высокоширотной ионосферы Земли. Установлено, что абсолютная величина поглощения составляет  $\sim 3$  дБ в интервале высот  $\sim 60$ – $90$  км, а в некоторых случаях достигает  $\sim 10$  дБ на уровнях от  $\sim 90$  до  $95$  км. Предполагается, что решение обратной задачи для поглощения радиоволн позволяет найти высотные профили коэффициента поглощения и оценить эффективное число столкновений в секунду в нижней ионосфере Земли.

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ № 19-02-00083 А).

## Литература

- Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С. Спутниковый мониторинг Земли: Радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 2014. – 208 с.
- Reiff P.H., Daou A.G., Sazykin S.Y. et al. Multispacecraft observations and modeling of the 22/23 June 2015 geomagnetic storm // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. P. 7311–7318, doi: 10.1002/2016GL069154.

**Спасибо за внимание!**