

РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ИОНОСФЕРЕ

Введение

Известно, что возмущения геомагнитного поля (ГМП) могут сильно влиять как на технические системы, так и на живые организмы, вплоть до смерти людей с заболеваниями сердца и технических аварий в энергосистемах [1, 2]. Возмущения ГМП связаны с естественными и искусственными изменениями магнитосферно-ионосферной токовой системы [3, 4].

Отметим, что чем ближе ионосферные токи к Земле, тем сильнее может быть их влияние на ГМП на поверхности Земли. В то же время средства регулярного наблюдения ГМП в нижней плотной ионосфере практически отсутствуют.

Впервые ГМП в плотной ионосфере было измерено еще на третьем ИСЗ, который имел орбиту с перигеем 226 км и апогеем 1881 км. При этом вблизи перигея, когда ИСЗ входил в слой F, регистрировались сильные изменения ГМП, что было связано с ионосферными токами [5].

В последние десятилетия количество магнитометрических ИСЗ значительно увеличилось. Однако они имеют почти круговые орбиты на высотах свыше 450 км, что связано с малым временем жизни ИСЗ в плотных слоях атмосферы [6, 7].

Измерения с помощью спутников имеют, кроме ограничений по высоте, и другие слабые стороны. В частности, из-за движения спутников непрерывное наблюдение магнитосферы и ионосферы в фиксированной области пространства оказывается невозможным, что значительно ограничивает наблюдение вариаций параметров во времени. Невозможно и измерение вертикального профиля указанных параметров. Все эти ограничения затрудняют исследование магнитосферно-ионосферных связей.

Известные радиолокационные методы позволяют осуществлять непрерывное измерение параметров ионосферы в фиксированной области на всех высотах. Однако для измерения параметров магнитосферы эти методы до сих пор не использовались.

Ниже кратко рассмотрены радиолокационные методы и средства измерения характеристик ионосферы и показано, что их можно использовать для одновременного измерения как характеристик ионосферы, так и продольной (вертикальной) составляющей напряженности ГМП в плотной ионосфере [8].

Можно ожидать, что при магнитных бурях (суббурях) или нагреве ионосферы вертикальная компонента напряженности ГМП должна существенно изменяться, поскольку обычно горизонтальные токи в ионосфере во много раз сильнее вертикальных.

Радиолокационные средства и методы зондирования ионосферы

Наиболее информативным средством зондирования ионосферы в ведущих ионосферных обсерваториях являются радары некогерентного рассеяния (НР). Отметим, что при прохождении радиоволны ионосферной подмагниченной плазмы от радара НР до высоты h и обратно поляризационный эллипс поворачивается на угол

$$\Phi(h) = k \int_0^h H(l)N(l)dl, \quad (1)$$

где $N(h)$ – концентрация электронов (КЭ), $H(h)$ – продольная составляющая напряженности ГМП, $k = 0,0594 f_0^{-2}$, f_0 – рабочая частота.

Принимаемый НР сигнал имеет шумовой характер, поэтому при измерении получают и анализируют его ковариационные функции. Можно показать, что в круговом

поляризационном базисе взаимная ковариационная функция и автоковариационные функции сигналов с противоположными направлениями вращения векторов поля имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{K}_{12}(\tau) &= e^{i2\Phi(h)} e^{i2\alpha} \rho_{12}(h) \gamma_0 \sqrt{1-\gamma_0^2} P(h) \dot{\rho}(h, \tau), \\ K_1(\tau) &= (1-\gamma_0^2) P(h) \dot{\rho}(h, \tau), \\ K_2(\tau) &= \gamma_0^2 P(h) \dot{\rho}(h, \tau). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $P(h)$ – мощность сигнала, $\dot{\rho}(h, \tau)$ – корреляционная функция (КФ) НР сигнала, $\rho_{12}(h)$ – взаимная корреляция сигналов левой и правой поляризаций, а параметры γ_0 и α зависят от поляризационной настройки передающей антенны.

а) *Основной метод радиолокационного зондирования ионосферы* основывается на совместном использовании радара НР и радара вертикального зондирования (ионозонда) [9, 10]. При этом с помощью радара НР по виду КФ НР сигнала $\dot{\rho}(h, \tau)$ определяют температуры электронов $T_e(h)$ и ионов $T_i(h)$, измеряют мощность сигнала и вычисляют функцию

$$f(h) = Ch^2 P(h) \beta(h), \quad (3)$$

где C – произвольный неизвестный коэффициент, $\beta(h) = 1 + T_e(h)/T_i(h)$.

Затем определяют нормированный высотный профиль КЭ и профиль КЭ в абсолютных единицах по формулам:

$$F(h) = \frac{f(h)}{f_m}, \quad N(h) = N_m F(h), \quad (4)$$

где N_m – КЭ на высоте ионосферного максимума, измеряемая с помощью ионозонда.

Для эффективного использования энергии передающую и приемную антенны радара НР настраивают на круговую поляризацию ($\gamma_0 = 0$) и используют один приемник. Для обеспечения достаточной точности измерения температур $T_e(h)$ и $T_i(h)$ используют зондирующий импульс большой длительности (на харьковском радаре 650 мкс, что обеспечивает разрешение по дальности около 100 км [11]).

б) *Поляризационный метод определения КЭ в ионосфере* основан на измерении эффекта Фарадея. Указанный метод хорош тем, что позволяет измерять абсолютное значение КЭ без использования ионозонда и без измерения температур.

Наиболее эффективные поляризационные способы, реализующие метод, основаны на измерении аргумента взаимной КФ (2) [10, 12, 13]. При этом осуществляют двухканальный прием в полном круговом поляризационном базисе. Вычисляя приращения угла поляризационного эллипса по высоте $\delta\Phi(h) = \Phi(h+\Delta) - \Phi(h)$ и полагая, что на заданном интервале высот $[h, h+\Delta]$ величина $N(h)$ постоянна, а величина $H(h)$ постоянна и известна, в соответствии с (1) можно определить КЭ по формуле

$$N(h) = \frac{\delta\Phi(h)}{kH(h)\Delta}, \quad (5)$$

Можно показать, что для обеспечения точности желательно излучать достаточно короткий импульс с линейной поляризацией ($\gamma_0 = 1/\sqrt{2}$).

Метод измерения напряженности ГМП в ионосфере [8]

Метод состоит в том, что выражения (4), (5) используют для вычисления оценки продольной составляющей напряженности ГМП по формуле

$$H(h) = \frac{\delta\Phi(h)}{\Delta k N(h)}. \quad (6)$$

При этом $\delta\Phi(h)$ измеряют поляризационным методом, а $N(h)$ определяют основным методом (по измерению профилей мощности НР сигнала и температур). Для одновременного измерения температур и эффекта Фарадея $\Phi(h)$ было предложено использовать сложный зондирующий сигнал [13]. Сигнал состоит из короткого и длинного импульсов с разными несущими частотами. Длинный импульс имеет круговую поляризацию и используется для измерения температур, а короткий имеет линейную поляризацию и используется для измерения параметра $\Phi(h)$, а также высотного профиля мощности $P(h)$ с высоким разрешением (на харьковском радаре НР около 20 км).

а) *Общая формула для относительной среднеквадратической ошибки (СКО) измерения напряженности ГМП* при малых ошибках следует из (6) и имеет вид

$$\frac{\sigma_H}{H} \approx \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\delta\Phi}}{\delta\Phi}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_N}{N}\right)^2},$$

где σ_H – СКО измерения напряженности ГМП, $\sigma_{\delta\Phi}$ – СКО измерения поляризационного параметра $\delta\Phi(h)$, σ_N – СКО оценки КЭ основным методом.

б) *Относительная СКО измерения поляризационного параметра* пропорциональна квадрату рабочей частоты, поскольку из (1) следует $\delta\Phi \approx k\Delta HN$ и $\frac{\sigma_{\delta\Phi}}{\delta\Phi} \approx \frac{\sigma_{\delta\Phi}}{kHN\Delta}$. Поэтому харьковский радар ($f_0=158$ МГц) оказывается в достаточно выгодном положении.

Указанная СКО определяется по формуле

$$\frac{\sigma_{\delta\Phi}}{\delta\Phi} \approx \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\delta\Phi_c}}{\delta\Phi}\right)^2 + (\varepsilon \sin 2\Phi)^2},$$

где $\sigma_{\delta\Phi_c}$ – СКО случайной составляющей ошибки, которая вызвана конечностью выборки и шумами приемника, ε [рад] – СКО фазовой погрешности настройки приемной антенны на круговую поляризацию.

Если при согласованном приемнике отсчеты параметра $\Phi(h)$ разнесены на величину разрешения по дальности, случайные ошибки можно считать некоррелированными. При этом $\sigma_{\delta\Phi_c} \approx \sqrt{2}\sigma_{\Phi_c}$, где σ_{Φ_c} – СКО случайной ошибки измерения параметра $\Phi(h)$.

Можно показать, что нижняя граница дисперсии этой случайной ошибки (граница Крамера – Рао) определяется выражением

$$\sigma_{\Phi_c}^2 = \frac{\left[1 - \rho_{12}^2 + \left(\frac{1}{q_2} + \frac{1}{q_1}\right) + \frac{1}{q_1 q_2}\right]^2}{4M\rho_{12}^2 \left\{1 - \rho_{12}^2 + \frac{1}{2q_2} + \frac{1}{2q_1}\right\}}, \quad (7)$$

где q_1 и q_2 – отношение сигнал/шум в приемниках, M – число тактов зондирования радара за время наблюдения.

Для харьковского радара НР при 15-минутном накоплении днем на высотах основной части слоя F величина $\sigma_{\delta\Phi_c}/\delta\Phi$ составляет около 1 %. С учетом СКО установки фазы для харьковского радара ($\varepsilon \approx 0,01$ рад) получим $\frac{\sigma_{\delta\Phi}}{\delta\Phi} \leq 1,4\%$.

Относительная СКО измерения КЭ основным методом определяется формулой

$$\frac{\sigma_N}{N} \approx \sqrt{\left(\frac{\sigma_F}{F}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{N_m}}{N_m}\right)^2},$$

где σ_F/F и σ_{N_m}/N_m представляют собой относительные СКО измерения нормированного высотного профиля КЭ радаром НР и измерения КЭ в ионосферном максимуме ионозондом, соответственно.

В максимуме ионизации $F \equiv 1$, так, что $\sigma_F = 0$ и погрешность измерения полностью определяется СКО измерения КЭ ионозондом. В условиях харьковской обсерватории указанная СКО не превышает 0,3 %. При удалении от максимума величина σ_F/F растет и, как видно из (3), определяется погрешностями измерения мощности и температур.

Потенциально для харьковского радара при 15-минутном накоплении относительная СКО измерения мощности НР сигнала составляет около 1 %. СКО случайных ошибок измерения отношения температур на указанных высотах, по-видимому, не превышает 5 – 6 %.

С учетом всех факторов величина σ_N/N в максимуме ионизации может составлять около 0,3 %, а в пределах основной части слоя F может достигать 6 %.

Таким образом, можно ожидать, что относительная СКО ошибки измерения напряженности ГМП σ_H/H в максимуме ионизации может составлять около 1,4 %, а в пределах основной части слоя F днем не должна превышать 7 %. За пределами слоя F и, особенно, выше его, отношение сигнал/шум резко падает и СКО резко нарастает.

Результаты эксперимента

Результаты эксперимента в целом подтвердили ожидаемые оценки точности. В качестве примера ниже приведены результаты, полученные в ионосферной обсерватории Харьковского института ионосферы днем 12.11.2012 при 15-минутном наблюдении, и проведен их анализ. Для оценки случайных ошибок измерения приведены данные, полученные в одноминутных сеансах.

Для поляризационных измерений, а также для измерения мощности НР сигнала использовался короткий (120 мкс) зондирующий импульс с линейной поляризацией. В описываемых измерениях для излучения линейно поляризованного сигнала один канал передатчика выключался на 15 мин. При этом излучаемая мощность оказывалась в два раза ниже. Эти потери мощности будут исключены после внедрения сложного зондирующего сигнала [13], позволяющего формировать короткий сигнал с линейной поляризацией с использованием двух каналов передатчика и двух ортогональных вибраторов антенны.

Для измерения температур в соседнем 15-минутном сеансе использовался длинный зондирующий импульс с круговой поляризацией. Поскольку температуры могут изменяться во времени, это приводит к дополнительной ошибке измерения ГМП. Эта погрешность также будет исключена в результате внедрения сложного зондирующего сигнала.

Основной интерес представляют данные, полученные на высотах плотной ионосферы, т. е. для приведенного примера приблизительно в диапазоне высот 220 – 320 км. Следует отметить, что измерение температур на высотах менее 180 км при длительности зондирующего импульса 650 мкс оказывается неэффективным.

На рис. 1 представлены результаты измерения КЭ основным методом, а на рис. 2 – поляризационным методом. При поляризационных измерениях КЭ использовалась модель магнитного поля IGRF [14].

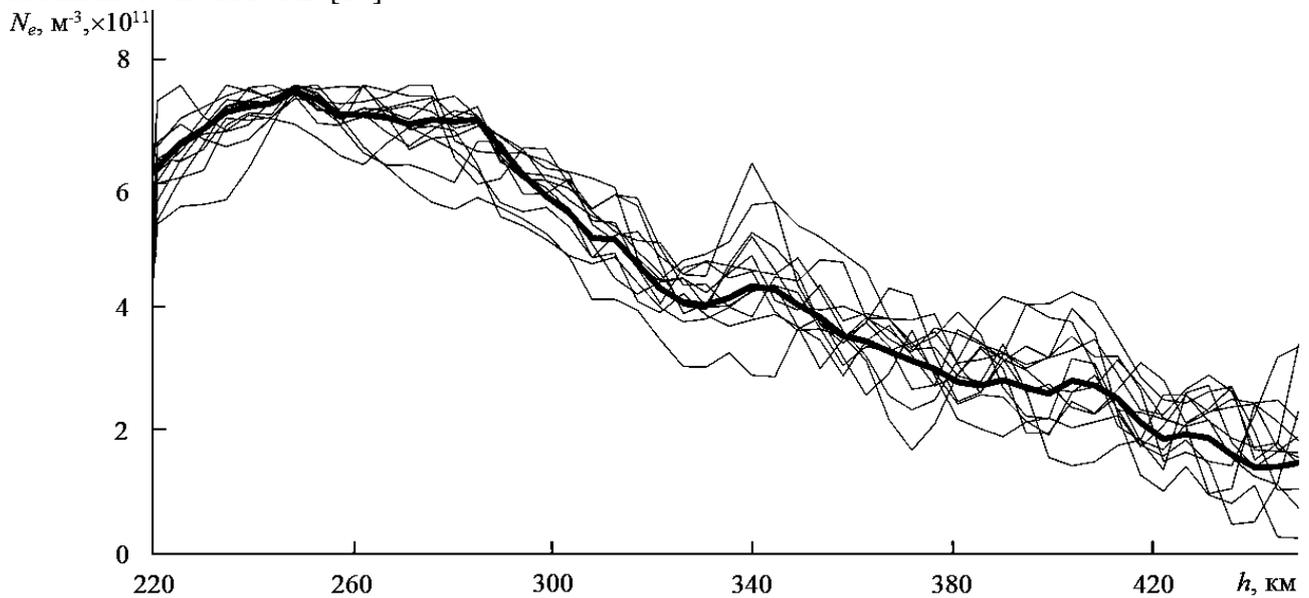


Рис.1

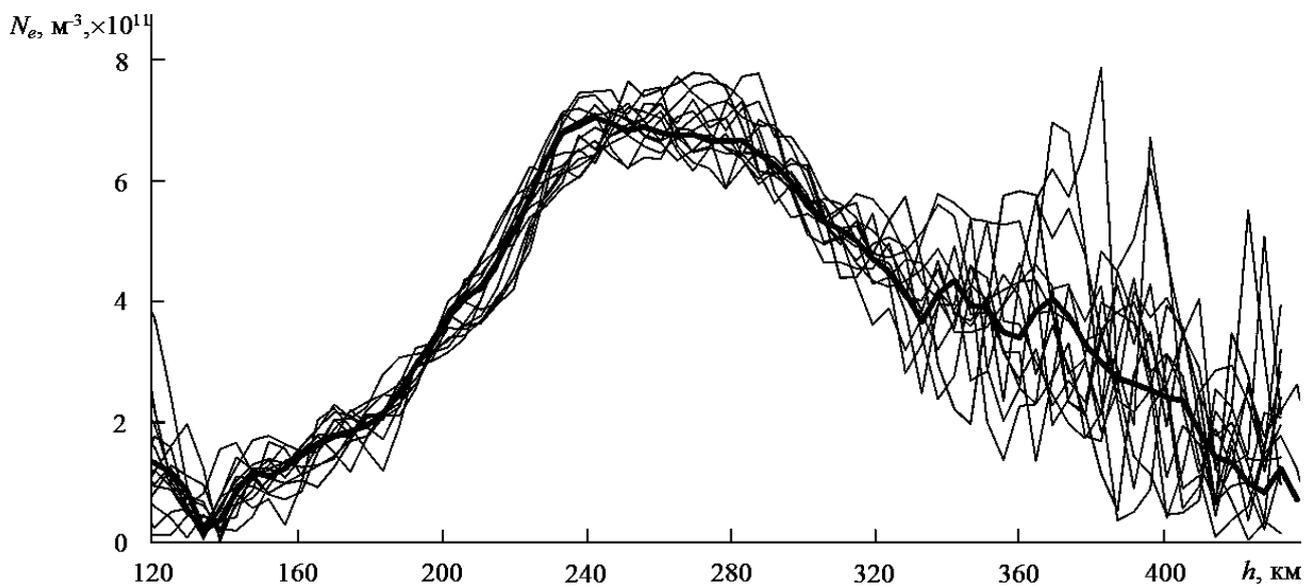


Рис.2

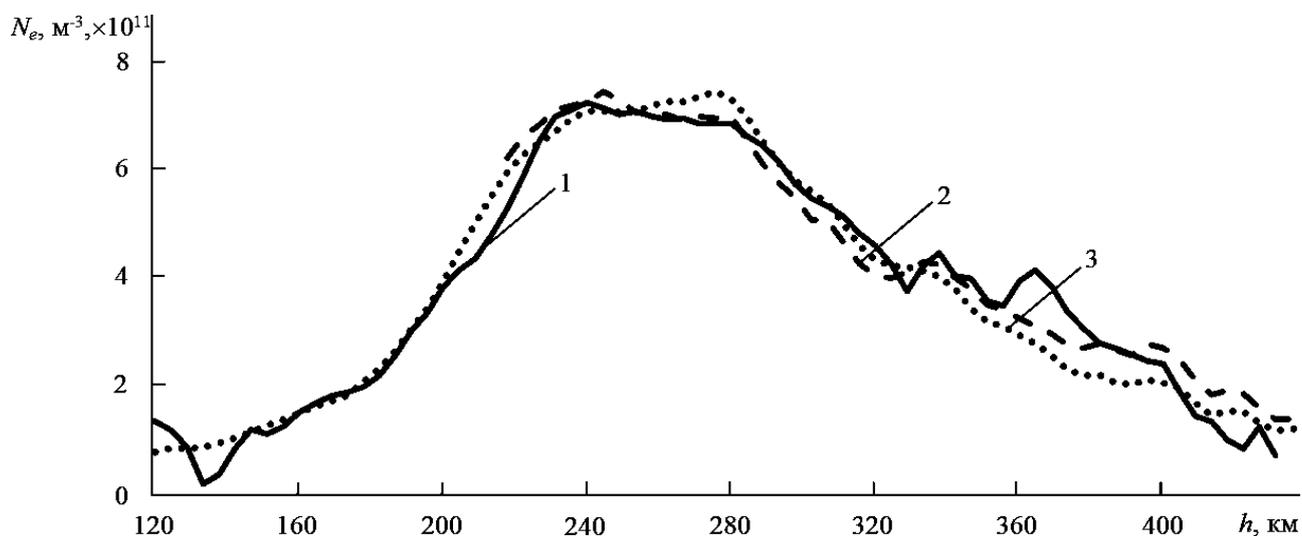


Рис.3

Толстая линия представляет результат измерения с 15-минутным накоплением, а тонкие линии – при одномоментных накоплениях. По виду тонких линий на рис. 1 можно судить о случайных ошибках измерения мощности сигнала, СКО которых составило примерно 2 % вблизи максимума ионизации.

На рис.3 представлены результаты 15-минутного накопления. Кривая 1 представляет КЭ, измеренную поляризационным методом, а кривая 2 представляет КЭ, полученную основным методом (они были приведены на рис. 1 и 2). Кривая 3 представляет результат, полученный основным методом с заменой измеренных температур на температуры, определенные по модели IRI [15].

Анализ рисунков позволяет сделать некоторые выводы:

1. В максимуме ионизации КЭ, измеренная поляризационным способом равна $7,31 \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$, а КЭ, измеренная ионозондом, равна $7,51 \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Различие оценок на 2,7 % можно принять как подтверждение достаточной точности поляризационного метода.

2. Для основного метода максимальное случайное отклонение результатов с одномоментным и 15-минутным накоплением составляет около 17 % на высоте 220 км и 25 % на высоте 320 км. Для поляризационного метода аналогичные отклонения составляют около 18 % на высоте 220 км и 22 % на высоте 320 км. Таким образом, случайные погрешности измерения КЭ обоими методами близки.

3. Если считать, что максимальное отклонение находится в пределах трех СКО, то СКО для указанных в п.2 высот для поляризационного метода составляет 6 и 7,3 % соответственно. Из этого следует, что при 15-минутном накоплении СКО составляет 1,6 и 1,9 %, а после внедрения сложного сигнала будет составлять 1,1 и 1,35 % соответственно. Полученные числа близки к нижней границе, определенной по формуле (7) для потенциала харьковского

радары НР. Это свидетельствует как о верности формулы (7), так и о высоком качестве алгоритма поляризационного измерения.

4. Близость всех трех кривых на рис. 3 в пределах указанного диапазона высот косвенно подтверждает хорошую точность обоих методов. Расхождение кривых в значительной мере может быть связано с отклонениями реального ГМП от модели IGRF.

5. На рис.3 видно, что измерение температур играет заметную роль в оценке КЭ основным методом.

6. На рис. 3 видно, что поляризационным методом можно эффективно измерять КЭ на высотах менее 220 км, где качественное измерение температур при длинном зондирующем импульсе затруднительно.

На рис. 4 и 5 представлены результаты измерения вертикальной составляющей напряженности ГМП.

На рис. 4 толстая линия представляет результат измерения на 15-минутном интервале времени, а тонкие линии – на одноминутных интервалах. Максимальное случайное отклонение на высотах 220 и 320 км составляет соответственно 25 и 45 %, что при 15-минутном

накоплении соответствует СКО 2,1 и 3,9 %. При использовании сложного сигнала и 15-минутном накоплении СКО составило бы 1,5 и 2,7 % соответственно.

На рис. 5 кривая 1 повторяет результат измерения напряженности ГМП при накоплении на 15-минутном интервале (толстая кривая на рис. 4), а кривая 2 построена по модели IGRF.

Как видно, на высотах 220 – 320 км измеренная величина в целом близка к модели. В максимуме ионизации отклонение от модели составило 1,4 %. В то же время на краях указанного диапазона высот наблюдаются отклонения до 14 %, которые трудно в полной мере объяснить случайными и методическими погрешностями и которые, по-видимому, в значительной мере связаны с ионосферными токами.

Следует также отметить, что заметные отклонения в данном эксперименте могут быть вызваны смещением во времени между измерением температур и измерением других параметров. Это смещение будет устранено после внедрения сложного сигнала.

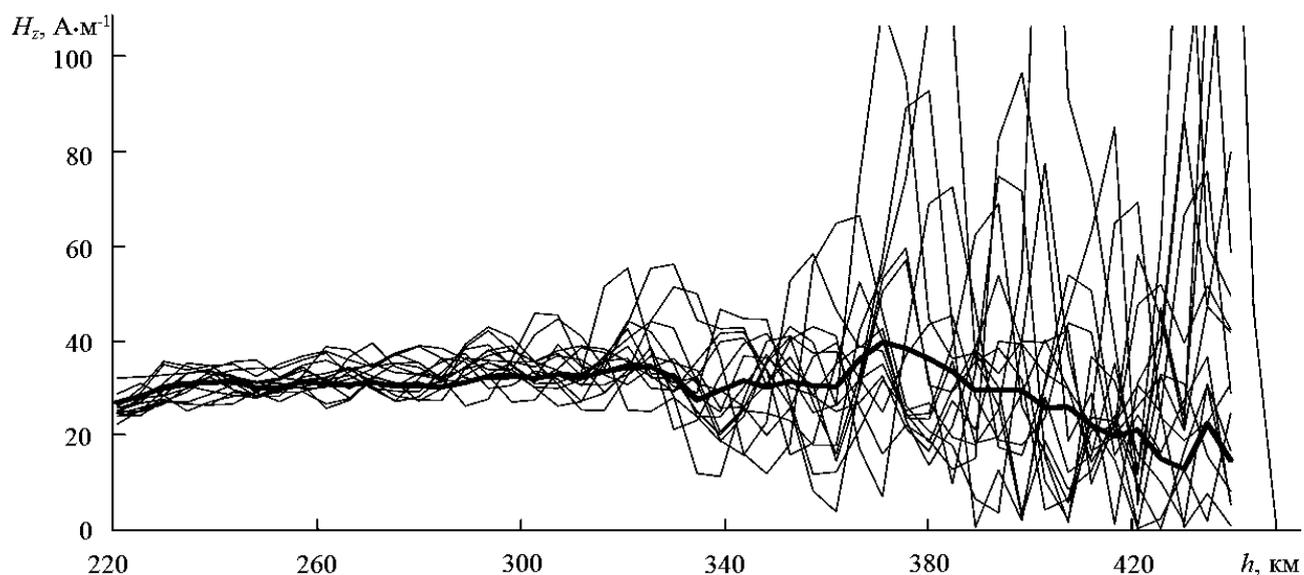


Рис. 4

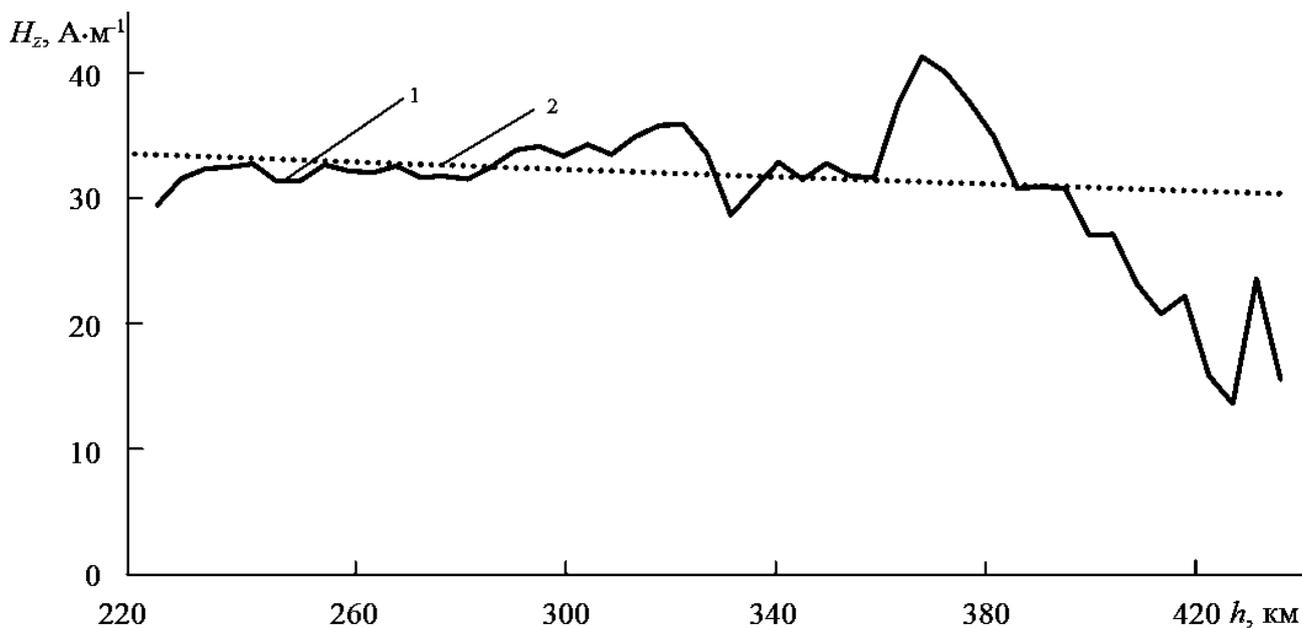


Рис. 5

Заключение

Непрерывное наблюдение геомагнитного поля в плотной ионосфере представляет актуальную задачу, которую трудно решить, используя магнитометры, установленные на ИСЗ.

Существенным достоинством предложенного радиолокационного метода является то, что, в отличие от измерений на ИСЗ, он позволяет проводить длительное и непрерывное одновременное зондирование магнитосферы и ионосферы на всех высотах плотной ионосферы в фиксированной области пространства. Поэтому, по мнению авторов, такие радиолокационные наблюдения могут быть полезными. Они могут способствовать лучшему пониманию как процессов, происходящих в плотной ионосфере, так и механизма ионосферных и магнитосферных возмущений и ионосферно-магнитосферных связей в целом.

Как показали проведенные теоретические и экспериментальные исследования, используя радиолокационный метод, можно эффективно измерять вертикальную составляющую напряженности ГМП в плотной ионосфере (слой F).

В частности, при использовании харьковского радара НР в дневное время при 15-минутном накоплении данных относительное среднеквадратическое отклонение составляет единицы процентов. При этом методические ошибки могут быть уменьшены за счет внедрения сложного зондирующего сигнала, совершенствования методик определения температур и критической частоты, а также поляризационной настройки приемной антенны.

Указанная величина погрешности измерения напряженности ГМП предложенным методом оказывается близкой к возмущениям ГМП на поверхности Земли, которые регистрируются при сильных магнитных бурях (суббурях).

Поэтому с помощью радиолокационного метода можно будет эффективно исследовать геомагнитные процессы, происходящие в слое F. При этом следует ожидать, что непосредственно в плотной ионосфере, где находится токовая система, возмущения ГМП должны быть намного сильнее, чем на поверхности Земли. Таким образом, можно ожидать, что предложенный метод позволит наблюдать медленные возмущения ГМП не только при сильных бурях.

Список литературы: 1. Лазутин Л. Воздействие магнитных бурь на техносферу и эффект смещения северного магнитного полюса [Электронный ресурс] // Исследования. – 2012. – № 108. – С. 10. – Режим доступа: <http://trv-science.ru/read-offline/18113/vozdejstvie-magnitnykh-bur-na-tekhnosferu-i>

ehfekt-smeshheniya-severnogo-magnitnogo-polyusa.pdf. 2. Чибисов С.М. Магнитные бури и хронофармакология сердечно-сосудистых "катастроф" [Электронный ресурс]: Виртуальная справочная служба "medi.ru": [http://medi.ru]. – Режим доступа: http://medi.ru/doc/a0590706.htm. 3. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие [Электронный ресурс]: Виртуальная справочная служба Сервер "СиЗиФ": [http://www.kosmofizika.ru]. – Режим доступа: http://www.kosmofizika.ru/spravka/mag_ion_inter.htm. 4. Experiments with the HAARP Ionospheric Heater [Электронный ресурс]: Виртуальная справочная служба Stanford VLF Group: [http://vlf.stanford.edu]. – Режим доступа: <http://vlf.stanford.edu/research/experiments-haarp-ionospheric-heater>. 5. Александров С.Г., Федоров Р.Е. Советские спутники и космические корабли. – М.: Изд-во академии наук СССР, 1961. – 440 с. 6. Matteo N.A. and Morton Y.T. Ionosphere geomagnetic field: Comparison of IGRF model prediction and satellite measurements 1991–2010 // Radio Sci. – 2011. – N 46. – P. 1–10. 7. Swarm 1, 2, 3 – КА для изучения магнитного поля Земли [Электронный ресурс]: Виртуальная справочная служба Mapgroup: [http://mapgroup.com.ua]. – Режим доступа: <http://mapgroup.com.ua/articles/34-kosmicheskie-apparaty> /evropa-evropejskoe-kosmicheskoe-agenstvo/433-swarm-1-2-3-ka-dlya-izucheniya-magnitnogo-polya. 8. Пат. 71162 Україна, МПК⁷ G 01 S 13/95. Спосіб вимірювання параметрів іоносфери і магнітосфери / Ємельянов Л.Я., Скворцов Т.О., Склярів І.Б., Фисун А.В.; заявник і патентовласник Інститут іоносфери НАН і МОНМС України. – № U201113371; заявл. 14.11.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. №13. – 4 с. 9. Эванс Дж. В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн // ТИИЭР. – 1969. – Т.57, №4. – С. 139–175. 10. Брюнелли Б.Е., Кочкин М.И., Пресняков И.Н. Метод некогерентного рассеяния радиоволн. – Л.: Наука, 1979. – 188 с. 11. Domnin I.F., Cherpurnyy Ya.M., Emelyanov L.Ya. et al. Kharkiv Incoherent Scatter Facility // Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Politechnic Institute". Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2014. – N 47 (1089). – P. 28–42. 12. Ткачев Г.Н., Карлов В.Д. Измерение разности фаз между обыкновенными и необыкновенными компонентами сигнала, рассеянного на тепловых флуктуациях электронной концентрации ионосферы // Вестн. Харьк. политехн. ин-та. Исследование ионосферы методом некогерентного рассеяния. – 1981. – Вып. 3, №183. – С. 18–27. 13. Пат. №68436 Україна, МПК⁷ G01S 13/95. Спосіб визначення концентрації електронів в іоносфері / Скворцов Т.О., Ємельянов Л.Я., Фисун А.В., Рогожкін С.В.; заявник і патентовласник Інститут іоносфери НАН і МОНМС України. – №U201110688; заявл. 05.09.2011; опубл. 26.03.2012, Бюл. №6. – 5 с. 14. Finlay, C.C., Maus, S., Beggan, C.D., Bondar, T.N. et al. International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Working Group V-MOD // Geophys. J. Int. – 2010. – V. 183, Issue 3. – P. 1216–1230. 15. Woodfield E.E., Wild J.A., Kavanagh A.J. et al. Combining incoherent scatter radar data and IRI-2007 to monitor the open closed field line boundary during substorms [Электронный ресурс] // J. Geophys. Res. 2010. – N 115. – Режим доступа к ресурсу: <http://onlinelibrary.wiley.com/store/10.1029/2010JA015751/asset/jgra20806.pdf?v=1&t=i3ra17po&s=fa58ce0a5d8314fd795ded3b6e99b9b9bfbf0b7f> (дата обращения: 16.12.2014).

Институт ионосферы НАН и МОН Украины
НТУ "ХПИ"

Поступила в редколлегию 17.09.2014