

УДК 550.388. 2

## ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛИ IRI-2012 ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ИОНОГРАММ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В.Д. Николаева<sup>a, b</sup>, М.В. Рыбаков<sup>c</sup>, А.Л. Котиков<sup>b, c</sup>, В.К. Кошелевский<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия, vera\_nik@list.ru

<sup>b</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, vera\_nik@list.ru

<sup>c</sup> Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Санкт-Петербург, Россия, mvr\_spb@rambler.ru

Исследуется возможность применения глобальной эмпирической модели IRI-2012 для полуавтоматической обработки данных вертикального зондирования ионосферы. Проведено сопоставление данных вертикального зондирования на станции СПБФ ИЗМИРАН в Воейково за февраль 2013 г. с результатами расчетов по модели IRI-2012 для основных ионосферных характеристик. В обработку вошло 2688 модельных значений параметров  $f_{0F_2}$ ,  $f_{0E}$ ,  $h_{mF_2}$ ,  $h_{mE}$  и 1866 реальных значений. По ионограммам определялись критические частоты ( $f_{0E}$ ,  $f_{0F_2}$ ) и высоты максимумов ( $h_{mF_2}$ ,  $h_{mE}$ ) слоев  $E$  и  $F_2$ . По измеренным частотам и высотам с использованием модели IRI-2012 восстанавливались вертикальные профили электронной концентрации. Расчет проводился также по модели без включения реальных данных вертикального зондирования. По данным вертикального зондирования и модельным значениям были рассчитаны среднемесячные значения и стандартные отклонения ( $\sigma$ ) для параметров  $f_{0F_2}$ ,  $f_{0E}$ ,  $h_{mF_2}$ ,  $h_{mE}$  для каждого часа суток. Определены условия применимости модели для автоматизированной обработки субавроуральной ионосферы. Модель IRI-2012 на этапе первоначальной обработки субавроуральной ионограммы может быть применена в дневные часы при невозмущенных условиях и отсутствии спорадической ионизации. При этом модельные отклонения могут быть скорректированы по ближайшим по времени реальным данным. Модельные данные для  $f_{0E}$  (в дневные часы) и  $h_{mF_2}$  могут быть применены для сокращения вычислительных затрат в системах автоматического поиска параметров по ионограммам и для предварительного определения диапазонов поиска основных определяемых параметров на основе расчета по модели IRI-2012. В отсутствие отдельных реальных значений модель IRI-2012 может быть применена для более точной аппроксимации рядов реальных данных. В условиях спорадической ионизации необходимо применять модели высокоширотной ионосферы, включающие блок корпускулярного ионообразования.

**Ключевые слова:** вертикальное радиозондирование, ионограмма, эмпирическая модель, критическая частота, высота максимумов.

### IRI-2012 MODEL ADAPTABILITY ESTIMATION FOR AUTOMATED PROCESSING OF VERTICAL SOUNDING IONOGRAMS

V. Nikolaeva<sup>d, e</sup>, M. Rybakov<sup>f</sup>, A. Kotikov<sup>e, f</sup>, V. Koshelevsky<sup>f</sup>

<sup>d</sup> Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia, vera\_nik@list.ru

<sup>e</sup> Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia, vera\_nik@list.ru

<sup>f</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences Saint Petersburg Branch (SPbF IZMIRAN), Saint Petersburg, Russia, mvr\_spb@rambler.ru

The paper deals with possibility of IRI-2012 global empirical model applying to the vertical sounding of the ionosphere semi-automatic data processing. Main ionosphere characteristics from vertical sounding data at IZMIRAN Voeikovo station in February 2013 were compared with IRI-2012 model calculation results. 2688 model values and 1866 real values of  $f_{0F_2}$ ,  $f_{0E}$ ,  $h_{mF_2}$ ,  $h_{mE}$  were processed.  $E$  and  $F_2$  layers critical frequency ( $f_{0E}$ ,  $f_{0F_2}$ ) and the maximum altitudes ( $h_{mF_2}$ ,  $h_{mE}$ ) were determined from the ionograms. Vertical profiles of the electron concentration were restored with IRI-2012 model by measured frequency and height. The model calculation was also made without the inclusion of the real vertical sounding data. Monthly averages and standard deviations ( $\sigma$ ) for the parameters  $f_{0F_2}$ ,  $f_{0E}$ ,  $h_{mF_2}$ ,  $h_{mE}$  for each hour of the day were calculated according to the vertical sounding and model values. Model applicability conditions for automated processing of ionograms for subauroral ionosphere were determined. Initial IRI-2012 model can be applied in the sub-auroral ionograms processing at daytime with undisturbed conditions in the absence of sporadic ionization. In this case model calculations can be adjusted by the near-time vertical sounding data. IRI-2012 model values for  $f_{0E}$  (in daytime) and  $h_{mF_2}$  can be applied to reduce computational costs in the systems of automatic parameters search and preliminary determination of the searching area range for the main parameters. IRI-2012 model can be used for a more accurate approximation of the real data series in the absence of the real values. In view of sporadic ionization, ionosphere models of the high latitudes must be applied with corpuscular ions formation unit.

**Keywords:** vertical sounding of the ionosphere, ionogram, empiric model, critical frequency, maximum height.

#### Введение

Вертикальное радиозондирование – один из основных методов, позволяющий эффективно проводить мониторинг состояния ионосферы. Полученные данные используются для решения широкого круга практических и теоретических задач. В настоящее время ведутся работы в направлении автоматизации обработки ионограмм и передачи данных ионосферных наблюдений в международную сеть [1]. Помимо результатов вертикального зондирования, для анализа состояния ионосферы широко используются как теоретические [2–6], так и эмпирические модели [7–9]. Эмпирические модели основываются на совокупности данных экспериментальных наблюдений за ионосферой. Такие модели из-за усреднений не

могут воспроизводить распределения параметров, соответствующие нестандартным условиям, например, конкретному геомагнитному возмущению. Таким образом, для проведения эффективного мониторинга целесообразно использовать адаптацию ионосферных моделей данными непосредственных измерений, полученных, в частности, при помощи вертикального зондирования.

Наиболее широко используемой эмпирической моделью ионосферы является глобальная модель IRI (International Reference Ionosphere) [8], рекомендуемая Committee on Space Research (COSPAR) и International Union of Radio Science (URSI). IRI-2012 – последняя версия модели – основана на данных измерений мировой сети ионозондов, радаров некогерентного рассеяния, спутников и ракет. Модель рассчитывает электронную концентрацию, температуру электронов и ионов; ионный состав и дрейфовую скорость в диапазоне высот 50–1500 км (слой D – 50–90 км; слой E – 90–130 км; слой F1 – 130–180 км; слой F2 – от 180 км). Помимо модельных профилей, рассчитанных только по дате, времени и координатам, модель IRI-2012 дает возможность построения вертикальных профилей ионосферных параметров с использованием реально измеренных величин критических частот и высот слоев E и F2.

Сопоставление расчетов по модели IRI-2007 с данными вертикального зондирования, проведенное для высоких широт [10], показало, что модель IRI-2007 недостаточно точно описывает специфику физических процессов в авроральной ионосфере (корпускулярные высыпания). В средних широтах такие процессы оказывают меньшее влияние на формирование ионосферных слоев, что делает целесообразным проведение оценки применимости результатов расчетов по эмпирической модели IRI-2012 в качестве дополнительного инструмента на этапе первоначальной обработки ионограмм и при анализе данных для субавроральной станции Санкт-Петербургского филиала Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (СПбФ ИЗМИРАН) в Воейково.

### Условия эксперимента

Было проведено сравнение расчетов по модели IRI-2012 с реальными данными ионозонда Canadian Advanced Digital Ionosonde (CADI) производства Scientific Instrumentation Limited (SIL, Канада) [11, 12] установленного в магнито-ионосферной обсерватории в Воейково СПбФ ИЗМИРАН (59°57' с.ш., 30°42' в.д.). В таблице приведены основные технические характеристики ионозонда CADI.

Характеристика	Значение
Мощность передатчика, Вт	600
Диапазон высот, км	90–1020
Диапазон частот, МГц	1–20
Разрешение по высоте, км	6
Максимальная длительность импульсов, мкс	40

Таблица. Технические характеристики ионозонда CADI

С января 2013 г. данные ионозонда – ионограммы вертикального зондирования с временным разрешением 15 мин – доступны в сети Internet [13]. На станции Воейково производится стандартная ручная обработка ионограмм.

### Анализ данных вертикального зондирования и модельные расчеты

В рассмотрение вошли часовые данные вертикального зондирования за февраль 2013 г. Этот период характеризовался умеренной солнечной активностью: индекс F10,7 в среднем был равен 101,8 (максимум 111,0 [ $10^{-22}$  Вт/(Гц·м<sup>2</sup>)).

По ионограммам определялись критические частоты ( $f_{0F_2}$ ,  $f_{0E}$ ) и высоты максимумов ( $h_{mF_2}$ ,  $h_{mE}$ ) слоев E, F<sub>2</sub>. По измеренным частотам и высотам с использованием модели IRI-2012 восстанавливались вертикальные профили электронной концентрации. Также проводился расчет по модели без включения реальных данных вертикального зондирования.

В обработку вошло 2688 модельных значений параметров  $f_{0F_2}$ ,  $f_{0E}$ ,  $h_{mF_2}$ ,  $h_{mE}$  и 1866 реальных значений, при этом 822 отсутствующих реальных значения в расчете параметров не участвовали и для построения реального профиля с помощью IRI интерпретировались как 0.

По данным вертикального зондирования и модельным значениям были рассчитаны среднемесячные значения (рис. 1 – зеленая линия) и стандартные отклонения ( $\sigma$ ) (рис. 1 – вертикальные отрезки) для параметров  $f_{0F_2}$ ,  $f_{0E}$ ,  $h_{mF_2}$ ,  $h_{mE}$  для каждого часа суток. На рис. 1, а–г, представлено сопоставление критических частот ( $f_{0F_2}$ ,  $f_{0E}$ ) и высот максимумов ( $h_{mF_2}$ ,  $h_{mE}$ ) слоев E, F<sub>2</sub> по данным вертикального зондирования с модельными величинами (рис. 1 – синяя линия) этих параметров. Количество реальных данных, вошедших в обработку ( $n$ ), варьируется в зависимости от времени суток и оцениваемых параметров.

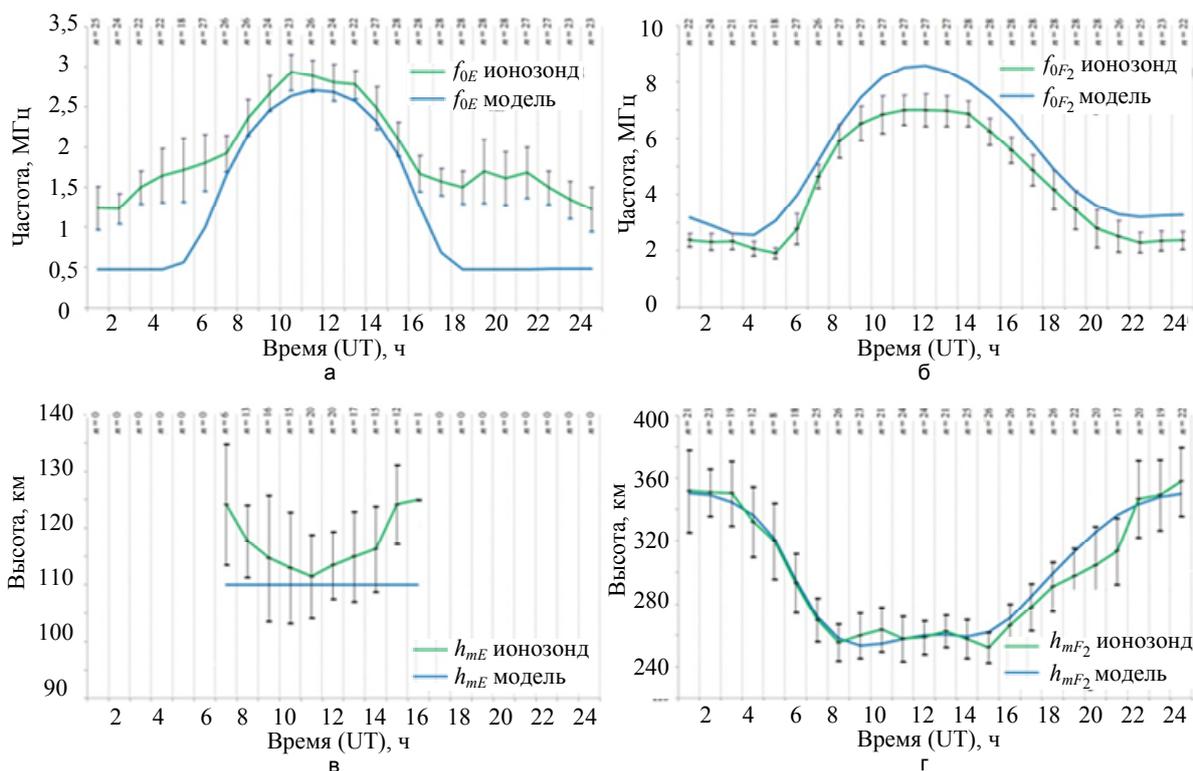


Рис. 1. Среднемесячные значения и стандартные отклонения ( $\sigma$ ) для параметров:  $f_{0E}$  – (а);  $f_{0F_2}$  – (б);  $h_{mE}$  – (в);  $h_{mF_2}$  – (г) для каждого часа суток, полученных по данным ионозонда станции Воейково (зеленая линия) и рассчитанных по модели IRI (синяя линия)

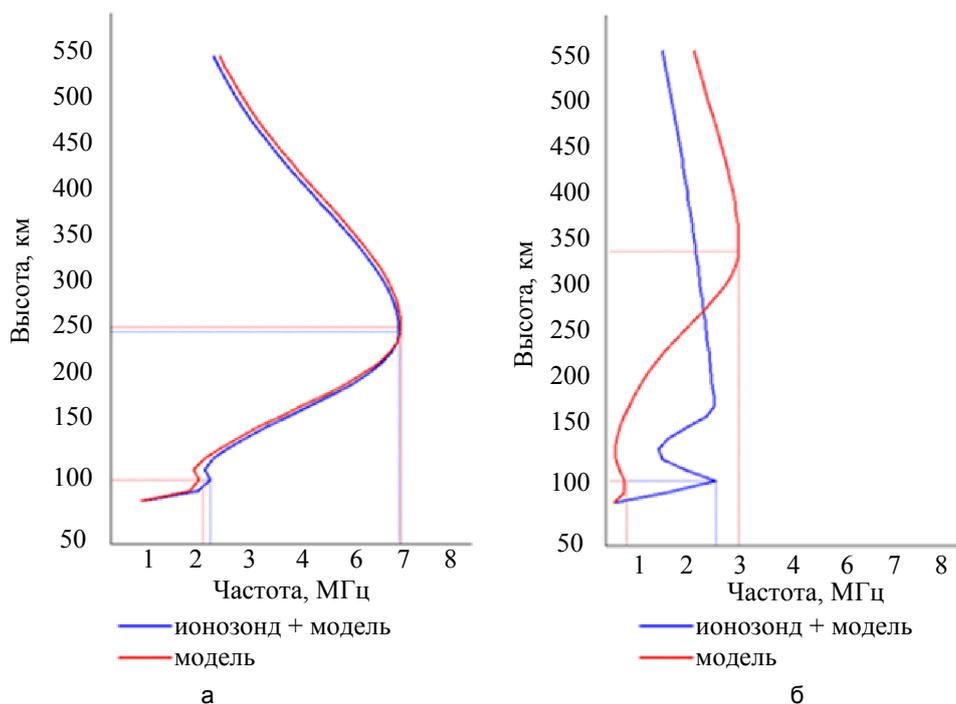


Рис. 2. Результаты сопоставления вертикального распределения частот, рассчитанного по модели IRI-2012 с коррекцией по данным вертикального зондирования (синяя кривая) и без коррекции (красная кривая); а – 8:00 UT 02.02.2013 г.; б – 19:00 UT 02.02.2013 г.

В дневные часы показано хорошее соответствие модельных расчетов и данных вертикального зондирования для критических частот слоя E. Однако от 17 до 7 ч Universal Time (UT) модель дает заниженные значения этого параметра (рис. 1, а). Подобный суточный ход электронной концентрации характерен для средних широт – выраженный полуденный максимум, связанный с суточным ходом ультрафиолето-

вого (УФ) потока солнечного излучения, и отсутствие корпускулярной ионизации в неосвященной ионосфере. Именно эти условия наилучшим образом обрабатываются моделью IRI.

Модельные значения  $h_{mE}$  лежат в пределах  $\pm 2,1 \sigma$  реальных значений (рис. 1, в). Различие модельных и реальных значений составляет до 14,2 км (2,019  $\sigma$ ). Модельный алгоритм при отсутствии реального значения  $h_{mE}$  определяет  $h_{mE} = 110$  км, что необходимо учитывать при анализе профиля, рассчитываемого моделью.

Наблюдается систематическое завышение модельных значений критической частоты  $f_{0F_2}$  (рис. 1, б) относительно реальных данных, что может быть связано с недостаточной точностью учета широтного распределения УФ излучения, задаваемого индексом F10,7. Диапазон разброса модельных значений  $f_{0F_2}$  от данных ионозонда – 0,4–1,8 МГц (тенденция завышения модельных значений). Наилучшее совпадение с экспериментом наблюдается при расчете максимальной высоты слоя F2 (рис. 1, г). Для  $h_{mF_2}$  модельные значения лежат в пределах  $\pm 1,1 \sigma$  реальных значений. Наибольшие расхождения наблюдаются в 9 ч UT, 14 ч UT и 20 ч UT исследуемого периода. Максимальное различие модельных и реальных значений составляет 23 км.

На рис. 2 представлены результаты сопоставления вертикального распределения частот, рассчитанного по модели IRI-2012 с коррекцией по данным вертикального зондирования (синяя кривая) и без коррекции (красная кривая).

Рис. 2, а, демонстрирует практически полное совпадение двух профилей для 8:00 UT 02.02.2013 г. Во втором случае (рис. 2, б) при появлении спорадического слоя Es модель показывает полное несоответствие реальным данным. При этом скорректированный реальными данными вертикальный профиль частот выше слоя E моделью не воспроизводится.

### Заключение

По результатам сопоставления данных вертикального зондирования и расчетов по модели IRI-2012 можно сделать следующие выводы:

- модель IRI-2012 на этапе первоначальной обработки субавроральной ионограммы может быть применена в дневные часы при невозмущенных условиях и отсутствии спорадической ионизации. При этом модельные отклонения могут быть скорректированы по ближайшим по времени реальным данным;
- модельные данные для  $f_{0E}$  (в дневные часы) и  $h_{mF_2}$  могут быть применены для сокращения вычислительных затрат в системах автоматического поиска параметров по ионограммам для предварительного определения диапазонов поиска основных определяемых параметров на основе расчета по модели IRI-2012;
- при отсутствии отдельных реальных значений модель IRI-2012 может быть применена для более точной аппроксимации рядов реальных данных;
- восстановление профиля электронной концентрации и получения параметров ионосферы при коррекции модели IRI-2012 данными вертикального зондирования ограничено появлением слоя Es;
- в условиях спорадической ионизации необходимо применять модели высокоширотной ионосферы, включающие блок корпускулярного ионообразования.

Полученные результаты используются при обработке ионограмм в СПбФ ИЗМИРАН и могут быть применены на магнитно-ионосферных станциях при обработке данных вертикального зондирования ионосферы.

### References

1. Grishentsev A.Yu., Korobeynikov A.G. Proektirovanie i tekhnologicheskaya podgotovka setei stantsii vertikal'nogo zondirovaniya ionosfery [Design and engineering background for station networks of vertical ionosphere sounding]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 3 (85), pp. 61–66.
2. Schunk R.W., Soika J.J. Ionospheric models. *Modern Ionospheric Science*. Eds H. Kohl, R. Rüster, K. Schlegel. Katlenburg-Lindau, Germany, European Geophysical Society, 1996, pp.181–215.
3. Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Bessarab F.S., Surotkin V.A., Glushchenko T.A., Naumova N.M. Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system. *Pure and Applied Geophysics*, 1988, vol. 127, no. 2/3, pp. 219–254.
4. Namgaladze A.A., Namgaladze A.N., Yurik R.Yu. Global modeling of the quiet and disturbed upper atmosphere. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2000, vol. 25, no. 5–6, pp. 533–536.
5. Namgaladze A.N., Evstafiev O.V., Khudukon B.Z., Namgaladze A.A. Model interpretation of the ionospheric F-region electron density structures observed by ground-based satellite tomography at sub-auroral and auroral latitudes in Russia in January-May 1999. *Annales Geophysicae*, 2003, vol. 21, no. 4, pp. 1005–1016.

6. Mingalev O.V., Mingaleva G.I., Melnik M.N., Mingalev V.S. Numerical Simulation of the Time Evolution of Small-Scale Irregularities in the F-Layer Ionospheric Plasma. *International Journal of Geophysics*, 2011, vol. 2011, pp. 353640-1–353640-8. doi: 10.1155/2011/353640
7. Sergienko T.I., Ivanov V.E. A new approach to calculate the excitation of atmospheric gases by auroral electron impact. *Annales Geophysicae*, 1993, vol. 11, no. 8, pp. 717–727.
8. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science*, 2001, vol. 36, no. 2, pp. 261–275.
9. Turunen E., Matveinen H., Tolvanen J., Ranta H. D-region ion chemistry model. *STEP Handbook of Ionospheric Models*. Ed. R.W. Schunk. Logan, Utah State University, 1996, pp. 1–25.
10. Nikolaeva V.D., Makarova L.N., Shirochkov A.V., Kotikov A.L. Sopostavlenie rezul'tatov raschetov modeli IRI-2007 s dannymi vertikal'nogo zondirovaniya i radara nekogerentnogo rasseyaniya dlya avroral'noi ionosfery [Comparison of results of calculations model the IRI-2007 data of vertical sounding and incoherent scattering radar for the auroral ionosphere]. *Proc. of the XXXIV Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena"*. Apatity, 2011, pp. 174–177.
11. *Canadian Advanced Digital Ionosonde (CADI)*. Scientific Instrumentation, Ltd. Available at: <http://www.sil.sk.ca/> (accessed 17.11.2013).
12. *Canadian advanced digital ionosonde. System manuals*. Saskatoon, Canada, Scientific instrumentation limited, 2009, 22 p.
13. *Ionosfera i rasprostranenie radiovoln* [The ionosphere, and radiowave propagation]. Archive ionograms. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences. Available at: <http://sphere.izmiran.ru/> (accessed 17.11.2013).

- |  |  |
|--|--|
| <b>Николаева Вера Дмитриевна</b>       | – инженер, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт; аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, vera_nik@list.ru  |
| <b>Рыбаков Михаил Васильевич</b>       | – ведущий инженер, Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Санкт-Петербург, Россия, mvr_spb@rambler.ru  |
| <b>Котиков Андрей Львович</b>          | – кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН; доцент, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, andkot54@mail.ru                |
| <b>Кошелевский Владимир Кириллович</b> | – кандидат физ.-мат. наук, зав. МИО Воейково, Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Санкт-Петербург, Россия, koshel42@yandex.ru   |
| <b>Vera Nikolaeva</b>                  | – leading engineer, Arctic and Antarctic Research Institute; postgraduate, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia, vera_nik@list.ru   |
| <b>Michael Rybakov</b>                 | – leading engineer, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences Saint Petersburg Branch (SPbF IZMIRAN), Saint Petersburg, Russia, mvr_spb@rambler.ru  |
| <b>Andrei Kotikov</b>                  | – PhD, senior scientific researcher, Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences Saint Petersburg Branch (SPbF IZMIRAN); associate professor, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia, andkot54@mail.ru |
| <b>Vladimir Koshelevsky</b>            | – PhD, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences Saint Petersburg Branch (SPbF IZMIRAN), Saint Petersburg, Russia, koshel42@yandex.ru   |