

О ВЛИЯНИИ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЙСМОГЕННОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В АТМОСФЕРЕ

В.В. Хегай, В.П. Ким, А.В. Карелин

Рассмотрен вопрос о влиянии солнечных космических лучей (СКЛ), изменяющих высотный профиль проводимости атмосферы, на распределение сейсмогенного электростатического поля в атмосфере Земли. Вообще говоря, проводимость атмосферы может зависеть как от воздействия «снизу» (грозовая активность, сейсмическая активность, радиоактивное загрязнение), так и «сверху» (солнечное и галактическое космическое излучение). В настоящем исследовании проведены конкретные расчёты распределения электростатического поля сейсмогенного происхождения в атмосфере для стандартных ночных условий и случая, когда профиль проводимости в нижней части атмосферы (в диапазоне от 30 до 70 км) существенно изменяется под воздействием потока СКЛ после вспышки на Солнце. Получено, что по сравнению со стандартным случаем, максимальное значение вертикальной компоненты электрического поля E_z падает почти в 10 раз, а радиальной компоненты электрического поля E_r примерно в 6 раз на высоте $z = 40$ км. При этом на верхней границе $z = 90$ км поле ослабевает всего на сотые доли процента по сравнению со стандартным случаем.

Ключевые слова: сейсмогенное электростатическое поле, солнечные космические лучи, проводимость атмосферы, вспышка на Солнце, мониторинг чрезвычайных ситуаций.

Введение

В работе [1] было показано, что крупномасштабное сейсмогенное электростатическое поле при определённых условиях может вызвать заметное перераспределение плазмы на высотах ночной F области ионосферы. При этом важную роль играет высотное распределение проводимости в диапазоне высот от нуля до 90 км, которое и определяет, по существу, степень проникновения поля на высоты ионосферы. В силу анизотропии проводимости выше уровня 70 км, ослабление поля происходит неодинаково для радиальной (горизонтальной) E_r и вертикальной E_z компонент электростатического поля, поэтому горизонтальная компонента электрического поля становится преобладающей и её значение примерно на порядок больше величины вертикальной компоненты.

Представляет интерес исследовать, как солнечные космические лучи (СКЛ) определённых энергий, обусловленные вспышками на Солнце, могут повлиять на проникновение электростатического поля сейсмогенного происхождения, на ионосферные высоты, так как в области достаточно высоких широт они могут в значительной мере увеличивать проводимость ионосферы на высотах от 20 до 80 км.

СКЛ проявляют себя эпизодически, поскольку генерируются не постоянно, а лишь во время мощных хромосферных вспышек. Такие внезапные всплески интенсивности СКЛ наблюдаются, как правило, в периоды наибольшей активности Солнца и называются солнечными протонными событиями (СПС). Величина потока СКЛ во время солнечной вспышки может достигать величины 10^6 частиц на

1 см^2 за 1 с, и по составу на $\sim 98 - 99\%$ они состоят из ядер водорода (протонов), и незначительного количества $\sim 1 - 2\%$ ядер гелия, их энергия меняется в диапазоне от 10^5 до 10^{10} эВ [2]. Здесь следует заметить, что мониторинг общей геофизической ситуации (и СПС в особенности) с помощью космических аппаратов (КА) необходим для правильной оценки изменений состояния околоземного космического пространства и всех его важнейших параметров (степени возмущённости ионосферы в различных высотных диапазонах, локальной и интегральной проводимостей и т. д.), поскольку их распределение решающим образом определяет величины электрических полей в верхней атмосфере (в том числе и через граничные условия для уравнений, описывающие их поведение).

Максимум ионизации СКЛ наблюдается на высотах 20 – 80 км [3]. С другой стороны, известно, что максимальная скорость ионизации на высоте ~ 40 км во время вспышки может возрастать более чем на два порядка величины [4], в соответствии с этим количество заряженных частиц, пропорциональное квадратному корню из этой величины, возрастёт по крайней мере в 10 раз, т. е. в результате мощной вспышки на этом уровне может произойти десятикратное увеличение проводимости.

Таким образом, для того, чтобы моделировать эффект воздействия СКЛ на проникновение электрического поля, следует задать соответствующее возмущение высотного профиля проводимости. На рис. 1 приведена высотная модель проводимости, использованная в расчётах. Штрих-пунктирной линией показано принятое возмущение профиля проводимости, обусловленное воздействием СКЛ.

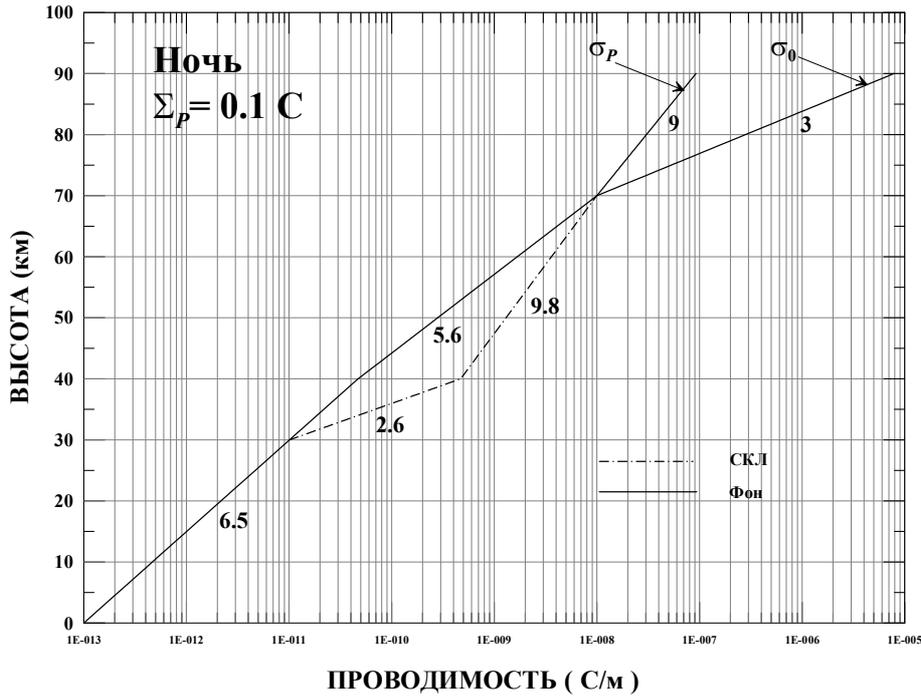


Рис. 1. Модель проводимости. Числа у прямых показывают обратный коэффициент показателя экспоненты (в км)

Фоновая (стандартная проводимость) показана сплошной линией. Нужная для расчётов интегральная проводимость Педерсена Σ_p взята в соответствии с геофизическими характеристиками 28.03.1964 03 LT (местное время) в точке 61° с. ш. и 148° з. д., что примерно соответствует положению эпицентра Аляскинского землетрясения, имевшего, по современным оценкам, магнитуду $M=9,3$.

Постановка задачи и результаты

Горизонтальное распределение для вертикальной компоненты электростатического поля источника E_z в атмосфере вблизи поверхности Земли предполагается аксиально-симметричным и квази-Гауссовским. В цилиндрической системе координат (z, r, φ) с началом в точке проекции центра источника на поверхность Земли, которая считается плоской, и осью z , направленной вверх, это распределение имеет вид

$$E_z(z \sim 0, r) = E_0 \times \exp\{-\ln(10) \times (r/r_0)^2\}, \quad (1)$$

где r_0 – это характерный масштаб, на котором исходное поле падает в 10 раз. Это распределение приведено на рис. 2.

Электростатическое поле \mathbf{E} в электрически пассивной проводящей среде определяется уравнениями

$$\text{Div}(\mathbf{j}) = 0, \quad (2)$$

$$\mathbf{j} = \underline{\underline{\sigma}}\mathbf{E}, \quad (3)$$

$$\mathbf{E} = -\text{grad}(\Phi), \quad (4)$$

где \mathbf{j} – плотность электрического тока; $\underline{\underline{\sigma}}$ – тензор электрической проводимости; Φ – электростатический потенциал. Среда предполагается горизонтально стратифицированной (т. е. $\underline{\underline{\sigma}}$ зависит только от z), а геомагнитное поле \mathbf{B} всюду считается постоянным и вертикальным ниже высоты $z=90$ км.

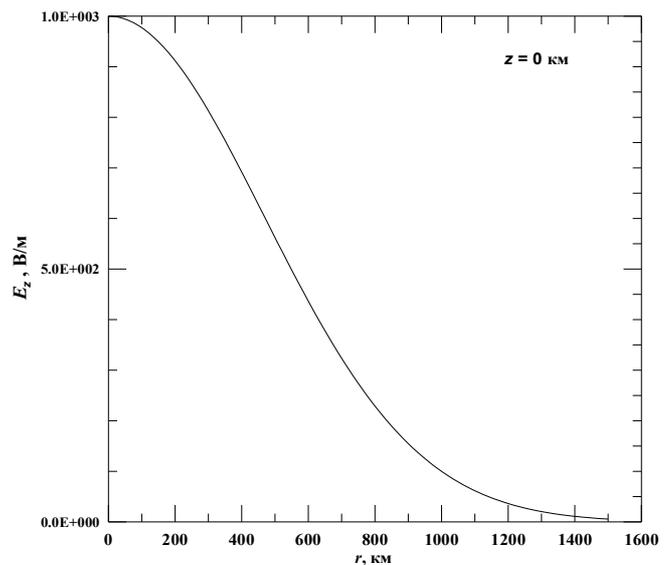


Рис. 2. Распределение электростатического поля приземного источника

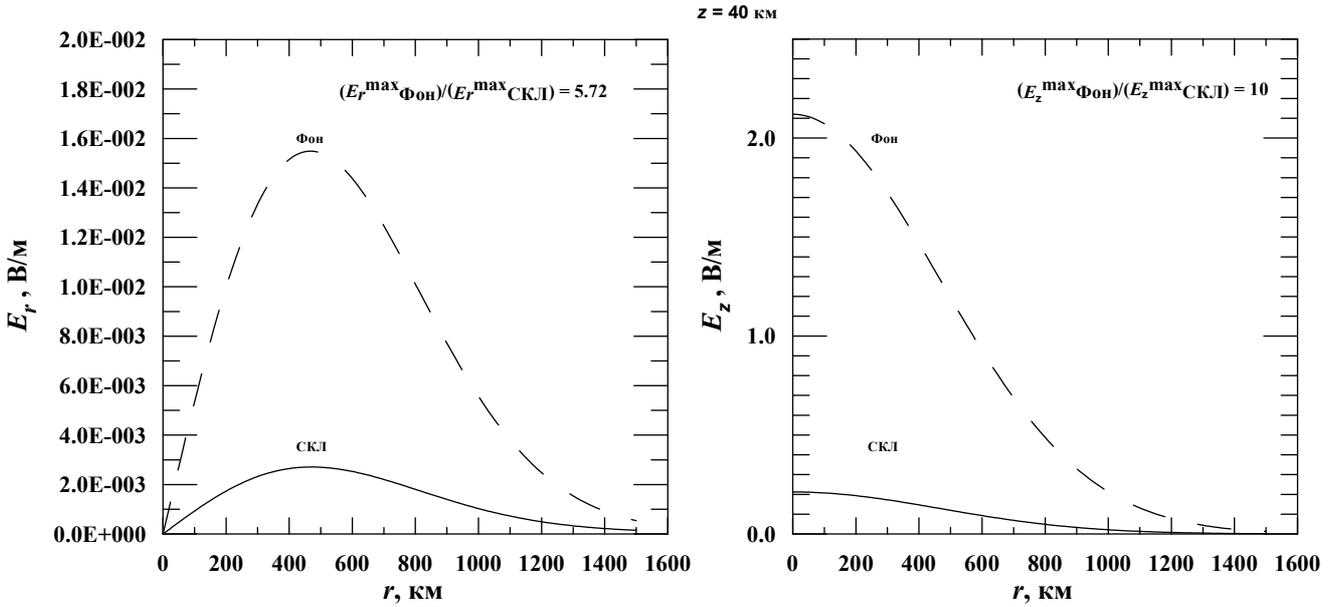


Рис. 3. Радиальная E_r и вертикальная E_z компоненты электростатического поля приземного источника с масштабом $r_0 = 1000$ км и $E_0 = 1000$ В/м в зависимости от расстояния r на высоте $z = 40$ км. Величины поля: --- — фоновые; — — с учётом воздействия СКЛ

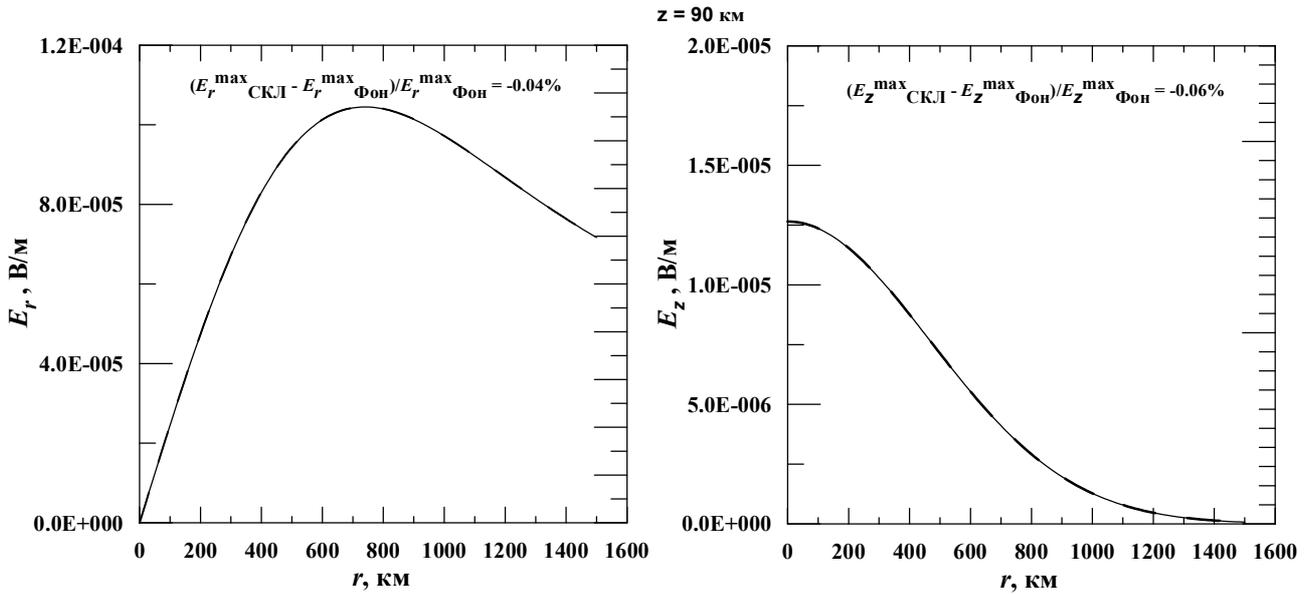


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, но для высоты $z = 90$ км

При этих допущениях уравнение для Φ в выбранной системе координат получается из (2) – (4) и имеет вид

$$\partial^2 \Phi / \partial r^2 + (1/r) \partial \Phi / \partial r + (1/\sigma_P) \partial / \partial z \{ \sigma_0 \partial \Phi / \partial z \} = 0, \quad (5)$$

где σ_P – проводимость Педерсена; σ_0 – проводимость вдоль геомагнитных силовых линий.

Ниже ~ 70 км эффекты геомагнитного поля на проводимость атмосферы пренебрежимо малы, т. е. проводимость изотропна ($\sigma_P = \sigma_0$) и она аппроксимируется простой экспоненциальной функцией высоты.

От 70 до 90 км проводимости σ_P и σ_0 также аппроксимируются экспонентами.

В качестве верхнего граничного условия ($z = 90$ км), вытекающего из уравнения непрерывности тока, используется выражение

$$\{\sigma_0 \partial \Phi / \partial z\} = \Sigma_P \{\partial^2 \Phi / \partial r^2 + (1/r) \partial \Phi / \partial r\}, \quad (6)$$

где Σ_P – интегральная по высоте проводимость Педерсена среды выше 90 км. Кроме того, предполагается, что электрический потенциал всюду непрерывен. В принятой постановке решение задачи выражается аналитически в виде квадратур [5].

Рис. 3 иллюстрирует результаты расчёта радиальной E_r и вертикальной E_z компонент электростатического поля в зависимости от расстояния r от оси z на высоте $z = 40$ км для ночных условий 28.03.1964 и масштаба $r_0 = 1000$ км с опорным значением $E_0 = 1000$ В/м.

Видно, что величина радиальной компоненты электрического поля от приземного источника в результате воздействия СКЛ падает на этой стратосферной высоте почти в 6 раз, а вертикальной – на порядок величины.

Совершенно другая картина наблюдается на уровне ионосферы $z = 90$ км и выше. При этом следует отметить, что на более высоких уровнях ионосферы в силу высоких значений проводимости вдоль геомагнитных силовых линий силовые линии являются эквипотенциалами, и поэтому компонента поля, перпендикулярная магнитному полю, почти не будет зависеть от высоты.

Распределение обеих компонент поля от модельного приземного источника в тех же обозначениях, но на высоте $z = 90$ км иллюстрирует рис. 4, из которого следует, что поле на этой высоте остаётся практически неизменным, несмотря на возрастание проводимости в нижней части профиля на высоте $z = 40$ км на порядок величины.

На рисунке кривые фона «сливаются» со своими аналогами, полученными с учётом воздействия СКЛ, однако точные вычисления показывают, что на уровне $z = 90$ км поле ослабевает всего на сотые доли процента по сравнению со стандартным случаем, при этом E_z^{\max} уменьшается на $\sim 0,06\%$, а $E_r^{\max} \sim$ на $0,04\%$ соответственно.

Выводы

Основной вывод состоит в том, что даже сильное воздействие СКЛ на проводимость в стратосфере не приводит к изменению электрического поля сейсмогенного происхождения на ионосферных уровнях. Однако на стратосферных высотах эффекты СКЛ могут вызывать уменьшение поля на

порядок величины по сравнению со случаем невозмущенного профиля проводимости на высотах стратосферы.

Можно считать установленным фактом, что проводимость атмосферы оказывает влияние на потенциал ионосферы [6]. Проводимость атмосферы может зависеть как от воздействия «снизу» (грозовая активность, сейсмическая активность, радиоактивное загрязнение), так и «сверху» (солнечное и галактическое космическое излучение). Причём на разных высотах доминируют различные источники ионизации. Однако в результате все они могут вызывать локальные и глобальные возмущения концентрации электронов в ионосфере. Детектирование этих возмущений из космоса может быть полезным в задачах мониторинга чрезвычайных ситуаций. Но для того, чтобы отделить возмущения «снизу» от возмущений «сверху» необходимо создавать орбитальную группировку спутников геофизического назначения на основе специализированных КА, одна часть из которых будет смотреть «вниз» (ионосфера, нижняя атмосфера, Земля), а другая часть – «вверх» (ионосфера, магнитосфера, Солнце) [7].

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН «Фундаментальные проблемы электродинамики и волновой диагностики атмосферы».

Литература

1. Kim V. P., Liu J. Y., Hegai V. V. Modeling the pre-earthquake electrostatic effect on the F region ionosphere // Adv. Space Res., 2012. – V. 50. – Issue 11. – P. 1524 – 1533. – [Digital resource]. – Available at : <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2012.07.023>.
2. Салаватинский С. А. Космические лучи и их роль в развитии физики высоких энергий и астрофизики / Под ред. С. А. Салаватинского // Соросовский образовательный журнал, 1999. – № 10. – С. 68 – 74.
3. Bazilevskaya G. A. Solar cosmic rays in the near Earth space and the atmosphere // Adv. Space Res., 2005. – V. 35. – Issue 3. – P. 458 – 464. – [Digital resource]. – Available at : [doi:10.1016/j.asr.2004.11.019](http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2004.11.019).
4. Reagan J. B., Meyerott R. E., Nightingale R. W., Gunton R. C., R. G. Johnson, Evans J. E., Imhof W. L., Heath D. F., Krueger A. J. Effects of August 1972 solar particle events on stratospheric ozone // J. Geophys. Res. – 1981. – V. 86. – Issue A3. – P. 1473 – 1494. – [Digital resource]. – Available at : [doi:10.1029/JA086iA03p01473](http://dx.doi.org/10.1029/JA086iA03p01473).
5. Hegai V. V., Kim V. P., Liu J. Y. On a possible seismomagnetic effect in the topside ionosphere // Adv. Space Res., 2015. – V. 56. – Issue 8. – P. 1707 – 1713. – [Digital resource]. – Available at : [doi: 10.1016/j.asr.2015.07.034](http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2015.07.034).

6. Пулинец С. А., Узунов Д. П., Давиденко Д. В., Карелин А. В. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера – атмосфера – ионосфера – магнитосфера, инициируемых ионизацией // Геомagnetизм и астрономия, 2015. – Т. 55. – № 4. – С. 521 – 538.

7. Асташкин А. А., Буров В. А., Журавлёв С. В., Карелин А. В., Лапшин В. Б., Пулинец С. А., Твердохлебова Е. М.,

Шувалов В. А., Яковлев А. А. Структура параметров геофизических процессов в околоземной среде. Основные принципы концепции перспективной космической системы мониторинга геофизической обстановки // Гелиогеофизические исследования. Электронный журнал. ISSN 2304-7380, 2015. – Вып. 13. – С. 10 – 18.

Поступила в редакцию 3. 02. 2016

Валерий Варламович Хегай, канд. физ.-мат. наук, заведующий отделом,
т. (495) 851-97-80,
e-mail: hegai@izmiran.ru.
(ИЗМИРАН).

Виталий Павлович Ким, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник,
т. (495) 851-97-80,
e-mail: kimvp9@gmail.com.
(ИЗМИРАН).

Александр Витальевич Карелин, д-р физ.-мат. наук, начальник отдела,
т. (495) 513-54-01,
e-mail: avkarelin@mail.ru.
(ФГУП ЦНИИмаши).

REGARING the IMPACT of the SOLAR COSMIC RAYS on the DISTRIBUTION of the SEISMOGENIC ELECTROSTATIC FIELD in the ATMOSPHERE

V.V. Khagai, V.P. Kim, A.V. Karelin

The article revises matters regarding the impact of solar cosmic rays, changing the height profile of the atmosphere conductivity, on the distribution of the seismogenic electrostatic field in Earth's atmosphere. Generally speaking the atmosphere conductivity may depend both from the impact 'from below' (thunderstorm activity, seismic activity, radioactive contamination) and 'from above' (solar and galactic cosmic radiation). The presented study provides certain calculations regarding the distribution of the electrostatic field of the seismogenic origin in the atmosphere for the regular night-time conditions as well as the specific condition, when the conductivity profile in the lower part of the atmosphere (range between 30 and 70 km) changes significantly when affected by the solar cosmic rays flux resulted from a solar flare. It has been resulted that the maximum value of the electric field vertical component E_z drops almost by 10 times in comparison to the regular case, while the value of the electric field radial component E_r drops by approximately 6 times on heights of $z = 40$ km. At the same time at the top border $z = 90$ km the field weakens for two decimal of percent in comparison to the regular case.

Key words: Seismogenic electrostatic field, solar cosmic rays, atmosphere conductivity, solar flare, emergency monitoring.

List of References

1. Kim V. P., Liu J. Y., Hegai V. V. Modeling the pre-earthquake electrostatic effect on the F region ionosphere // Adv. Space Res. – 2012. – V. 50. – Issue 11. – P. 1524 – 1533. – [Digital resource]. – Available at : <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2012.07.023>.
2. Salavatinskii S. A. Cosmic rays and its contribution in the development of astrophysics and high energy physics / Ed. by Salavatinskii S. A. // Soros educational magazine. – 1999. – № 10. – P. 68 – 74.
3. Bazilevskaya G. A. Solar cosmic rays in the near Earth space and the atmosphere // Adv. Space Res., 2005. – V. 35. – Issue 3. – P. 458 – 464. – [Digital resource]. – Available at : [doi:10.1016/j.asr.2004.11.019](https://doi.org/10.1016/j.asr.2004.11.019).
4. Reagan J. B., Meyerott R. E., Nightingale R. W., Gunton R. C., R. G. Johnson, Evans J. E., Imhof W. L., Heath D. F., Krueger A. J. Effects of August 1972 solar particle events on stratospheric ozone // J. Geophys. Res. – 1981. – V. 86. – Issue A3. – P. 1473 – 1494. – [Digital resource]. – Available at : [doi:10.1029/JA086iA03p01473](https://doi.org/10.1029/JA086iA03p01473).
5. Khagai V. V., Kim V. P., Liu J. Y. On a possible seismomagnetic effect in the topside ionosphere // Adv. Space Res., 2015. – V. 56. – Issue 8. – P. 1707 – 1713. – [Digital resource]. – Available at : [doi:10.1016/j.asr.2015.07.034](https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.07.034).
6. Pulinets S. A., Uzunov D. P., Davidenko D. V., Karelin A. V. Physical foundations of generating the short-term earthquake precursors. Complex design of the geophysical processes, initiated by ionization, within the lithosphere – atmosphere – ionosphere – magnetosphere system // Geomagnetism and astronomy. – 2015. – V. 55. – № 4. – P. 521 – 538.

7. Astashkin A. A., Burov V.A., Zhuravlev S. V., Karelin A. V., Lapshin V. B., Pulinets S. A., Tverdokhlebova E. M., Shuvalov V. A., Iakovlev A. A. Parameter structure of the geophysical processes occurring in the near-earth space. General principles of the perspective space system monitoring geophysical conditions // Heliophysical research. Electronic magazine. ISSN 2304-7380, 2015. – Issue 13. – P. 10 – 18.

Valerii Varlamovich Khagai, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D), Head of Department, tel. (495) 851-97-80, e-mail: hegai@izmiran.ru. (IZMIRAN).

Vitalii Pavlovich Kim, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D), Leading Researcher, tel. (495) 851-97-80, e-mail: kimvp9@gmail.com. (IZMIRAN).

Alexandr Vitalevich Karelin, Doctor of Physics and Mathematics (D. Sc.), Head of Department, tel. (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@mail.ru. (FSUE TSNIIMASH).