

## ПРИМЕНЕНИЕ АНСАМБЛЕВОГО ПОДХОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ИОНОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**М.В. Клименко**<sup>1,2</sup>, **В.В. Клименко**<sup>1,2</sup>, **Ф.С. Бессараб**<sup>1,2</sup>, **К.Г. Ратовский**<sup>3</sup>, **Т.В. Суходолов**<sup>1,2</sup>, **Е.В. Розанов**<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова  
РАН, Калининград, Россия  
maksim.klimenko@mail.ru

<sup>3</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

## APPLICATION OF THE ENSEMBLE APPROACH FOR IONOSPHERIC INVESTIGATIONS BASED ON SIMULATION RESULTS

**M.V. Klimenko**<sup>1,2</sup>, **V.V. Klimenko**<sup>1,2</sup>, **F.S. Bessarab**<sup>1,2</sup>, **K.G. Ratovsky**<sup>3</sup>, **T.V. Sukhodolov**<sup>1,2</sup>, **E.V. Rozanov**<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>St Petersburg University, Sankt Petersburg, Russia

<sup>2</sup>West Department of the Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,  
Kaliningrad, Russia  
maksim.klimenko@mail.ru

<sup>3</sup>Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

**Аннотация.** Представлена оценка значимости ионосферного отклика на солнечные и магнитосферные протоны, полученная на основе проведенных и проанализированных восьми ансамблевых расчетов для спокойных условий и восьми аналогичных расчетов для возмущенных условий.

**Ключевые слова:** модель, космическая погода, система ионосфера—плазмосфера, атмосфера.

**Abstract.** We estimate the significance of ionospheric response to solar and magnetospheric protons. The estimation was obtained on the basis of eight ensemble calculations performed and analyzed for quiet conditions, and eight similar calculations for disturbed conditions.

**Keywords:** model, space weather, ionosphere—plasmaphere system, atmosphere.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из актуальных задач физики околоземной космической плазмы является создание корректной глобальной модели атмосферы и ионосферы с учетом самосогласованного описания электрических полей. Шаги в этом направлении уже делаются. Например, продолжается объединение моделей TIE-GCM и WACCM-X в Обсерватории верхней атмосферы (HAO NCAR) [Pedatella et al., 2016]. Канадская модель ионосферы и атмосферы (C-IAM) находится также в стадии разработки. Модель представляет собой сочетание расширенной версии канадской модели средней атмосферы (CMAM) и модели верхних слоев атмосферы (UAM). Модель C-IAM и некоторые полученные с ее помощью результаты кратко представлены в [Martynenko et al., 2014]. Модель EAGLE представляет собой объединение химико-климатической модели (ХКМ) HAMMONIA (MPI-MET, Гамбург, Германия) с моделью GCM ТИП (Калининград, Россия). С помощью модели EAGLE был проведен ряд научных исследований, позволивший интерпретировать некоторые особенности распределения параметров верхней атмосферы на основе атмосферно-ионосферного взаимодействия [Klimenko et al., 2019].

Недавно модель всей атмосферы EAGLE использовалась для изучения влияния солнечных протонных событий (СПС) и высыпаний магнитосферных протонов на поведение параметров системы атмосфера—ионосфера в январе 2005 г.

[Bessarab et al., 2021]. Наиболее сильные события с 15 по 23 января 2005 г. произошли 17 и 20 января. СПС 20 января было самым мощным событием типа Ground Level Enhancement (GLE) за более чем 50 последних лет. Протонные события и значительные высыпания магнитосферных протонов происходили на фоне геомагнитных возмущений, которые значительно воздействуют на ионосферу и тем самым маскируют ионосферные эффекты солнечных и магнитосферных протонов в данных наблюдений. Характеристики потоков солнечных и магнитосферных протонов и скорости ионизации от них рассчитывались с помощью модели AIMOS (Atmospheric Ionization Module Osnabrück) [Wissing, Kallenrode, 2009], которая использует данные спутниковой группировки GOES и POES. Несмотря на относительную прозрачность термосферы для протонов высоких энергий, в численных экспериментах [Bessarab et al., 2021] был получен ионосферный отклик на СПС и протонные высыпания из хвоста магнитосферы. На высотах F2-слоя ионосферы положительные возмущения электронной концентрации формируются в приэкваториальной области вследствие генерации динамических процессов в стратосфере и мезосфере, которые вызывают направленный к экватору перенос атомарного кислорода. Было показано также, что на фазе восстановления после усиления солнечных и магнитосферных протонов концентрация электронов в области F ионосферы и полное электронное содержание на низких и средних

широтах растут, что связано с увеличением концентрации атомарного кислорода. Целью данной работы является оценка значимости ионосферного отклика на солнечные и магнитосферные протоны.

## МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки значимости ионосферного отклика на солнечные и магнитосферные протоны было проведено восемь ансамблевых расчетов для спокойных условий и восемь аналогичных расчетов для возмущенных условий. В вариантах расчетов для спокойных условий высыпания электронов и протонов не менялись день ото дня, оставаясь такими же, как и для 1 января 2005 г., т. е. для восьми ансамблевых расчетов в спокойных условиях указанные выше параметры оставались неизменными. В расчетах для возмущенных условий высыпания электронов брались такими же, как и в спокойных условиях, а протонные высыпания менялись каждые два часа согласно модели AIMOS. Во всех ансамблевых расчетах неизменными оставались солнечная активность, разность потенциалов через полярные шапки, продольные токи 2-ой зоны (как в спокойных условиях) и высыпания авроральных электронов. В ансамблевых расчетах начальные условия полей температур на высотах 0–90 км случайным образом менялись на 1–2 К. При этом с одними и теми же начальными условиями проводилось два расчета с 1 по 31 января: один для спокойных условий, другой — для возмущенных. На основе ансамблевых расчетов были получены восемь ансамблевых возмущений среднезональных значений полного электронного содержания (ПЭС). Затем мы рассчитали математическое ожидание возмущений ПЭС, среднеквадратическое отклонение (СКО) этих возмущений от математического ожидания и их отношение, которое фактически представляет собой отношение сигнал/шум.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Анализ полученных результатов позволил выявить роль процессов, происходящих в стратосфере, мезосфере и термосфере, в формировании возмущений глобального и полного электронного содержания в периоды солнечных протонных событий и геомагнитных бурь. На основе анализа ансамблевых расчетов эффектов протонных высыпаний в январе 2005 г. и их статистического анализа показано, что значения шума (СКО), вызванного атмосферно-ионосферными связями, в возмущениях ПЭС близки к нулю в высоких широтах и максимальны в низкоширотной и экваториальной областях. Интересным фактом является то, что СКО в ПЭС имеет четкую УТ-вариацию с максимумом в начале суток и минимумом во второй половине каждых суток. Что касается значимости возмущений ПЭС, можно заметить, что в высоких широтах Северного полушария в ПЭС формируется слабозашумленный значимый положительный эффект от протонных высыпаний. На средних и низких широтах возмущения ПЭС с отношением сигнал/шум  $>1$ ,

связанные с протонными высыпаниями, формируются 17, 18 и 22 января 2005 г.

Работа выполнена при поддержке Мегагранта Правительства Российской Федерации № 075-15-2021-583.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Klimenko M.V., et al. Ionospheric response to solar and magnetospheric protons during January 15–22, 2005: EAGLE whole atmosphere model results. *Adv. Space Res.* 2021. Vol. 67, no. 1. P. 133–149. DOI: [10.1016/j.asr.2020.10.026](https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.026).

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S., et al. Identification of the mechanisms responsible for anomalies in the tropical lower thermosphere/ionosphere caused by the January 2009 sudden stratospheric warming. *J. Space Weather Space Climate.* 2019. Vol. 9, no. A39. P. 14. DOI: [10.1051/swsc/2019037](https://doi.org/10.1051/swsc/2019037).

Martynenko O. et al. Effects on the low-latitude ionospheric structure of the lower atmosphere dynamics and magnetospheric electric field as produced by the C-IAM. *XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*. Beijing, 2014. P. 1–4. DOI: [10.1109/URSIGASS.2014.6929776](https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2014.6929776).

Pedatella N.M. Impact of the lower atmosphere on the ionosphere response to a geomagnetic superstorm. *Geophys. Res. Lett.* 2016. Vol. 43, iss. 18. P. 9383–9389. DOI: [10.1002/2016GL070592](https://doi.org/10.1002/2016GL070592).

Wissing J.M., Kallenrode M.B. Atmospheric Ionization Module OSnabrück (AIMOS): A 3D model to determine atmospheric ionization by energetic charged particles from different populations. *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114, no. A6. DOI: [10.1029/2008JA013884](https://doi.org/10.1029/2008JA013884).