

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ

В.М. Уваров

*Петербургский государственный университет путей сообщения*

**Аннотация.** Дана сводка основных результатов, полученных при использовании численной модели полярной ионосферы, разработанной В.М. Уваровым, П.Д. Барашковым и А.П. Захаровой в 1992 году.

В 1977 году автором статьи в рамках научно-исследовательской работы и по запросу свыше был написан обзор на тему «Современное состояние вопроса моделирования полярной ионосферы». Однако вместо указания сделать вывод о том, что моделировать полярную ионосферу на данном этапе нельзя (по прозаической причине отсутствия сотрудников, способных решать эту проблему), был сделан вывод о возможности построения такой модели.

Как это часто бывает в современной науке вскоре выяснилось, что идею автора активно начали развивать более энергичные исследователи и, к сожалению, завели работу в тупик.

Условия для продолжения работы по созданию модели полярной ионосферы возникли в рамках сотрудничества с П.Д. Барашковым из ЯФ СО АН СССР. Такая модель была создана и впервые опубликована в статье 1992 года под названием «Модель полярной ионосферы с учетом влияния межпланетной среды. 1. Эффект азимутальной компоненты ММП». Как видно из названия [1], намечался цикл публикаций по данной тематике.

Прежде всего была решена проблема расчета траекторий конвекции, вдоль которых можно было решать одномерную задачу о высотном распределении электронной концентрации. В работе [2] получена система двух динамических уравнений, описывающих дрейф плазменной трубки, и приведено решение, проиллюстрированное в виде двумерной картины дрейфа плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях.

Далее была разработана модель электрического поля в полярной ионосфере, контролируемая как геомагнитным Kp индексом [3], так и параметрами межпланетной среды [4] – скоростью солнечного ветра и компонентами межпланетного магнитного поля (ММП). В рамках модели [4] удалось воспроизвести не только все известные на тот момент времени распределения электрических полей вдоль меридиана утро – вечер, но и получить три новых типа распределения, подтвердившихся позже.

Выполненный в [4] расчет траекторий конвекции показал реализацию, в зависимости от сочетания азимутальной и вертикальной компонент ММП, двух-вихревых, трех-вихревых и четырех-вихревых картин конвекции.

Расчет высотного распределения электронной концентрации в конвектирующей плазменной трубке, и, в конечном счете, расчет трехмерного распределения электронной концентрации в полярной ионосфере был выполнен в предположении двух-ионного состава – обобщенный молекулярный ион и ион атомарного кислорода. При этом концентрация этих ионов рассчитывалась на основе уравнений фотохимического равновесия и конвективно-диффузионного уравнений, соответственно [1].

Развитая таким образом модель полярной ионосферы была успешно верифицирована путем сопоставления с экспериментальными данными рассчитанных высотных профилей электронной концентрации и рассчитанных двумерных распределений электронной концентрации Ne в максимуме слоя F2. Это позволило отнести с достаточной степенью доверия к двумерным распределениям N<sub>emax</sub> F2, рассчитанным для всего многообразия картин конвекции (двух-вихревых, трех-вихревых и четырех-вихревых), обусловленных различным сочетанием азимутальной и вертикальной компонент ММП [1,5].

Следует отметить, что на рассчитанные значения электронной концентрации влияет выбор той или иной модели нейтральной атмосферы. Поэтому сопоставление рассчитанных и измеренных значений может, хотя

и косвенно, служить критерием в выборе наиболее адекватной модели нейтральной атмосферы. Так в работе [6] было установлено, что для условий высокой солнечной активности нейтральный состав наиболее адекватно описывает модель [7].

В работе [8] рассмотрено влияние впечатляющего дрейфа магнитных полюсов Земли, за несколько последних десятилетий, на строение ионосферы Земли. С целью проиллюстрировать эволюцию структуры полярной ионосферы были проведены расчеты для 1955 и 2024 годов при одинаковых гелиогеофизических условиях.

Сопоставление полученных картин изолиний электронной концентрации в максимуме слоя F2 не выявило ожидаемых значительных качественных и количественных расхождений несмотря на значительное перемещение магнитного полюса за этот период времени (его географическая коширота изменилась от 14.7 до 4.0 градуса, а географическая долгота от 101.1 до 142.0 градусов).

Полученный результат объясняется тем, что при численном моделировании используется дипольная аппроксимация магнитного поля. В данном случае следует принять во внимание дрейф не магнитных полюсов, а дрейф так называемых геомагнитных полюсов, характеризующих положение магнитного диполя, который выражен куда менее значительно (его географическая коширота изменилась от 11.5 до 9.2 градуса, а географическая долгота от -69.5 до -72.6 градусов). Ход дрейфа магнитного и геомагнитного полюсов проиллюстрирован на рис. 1, который опубликован на сайте японской обсерватории в Киото [9].

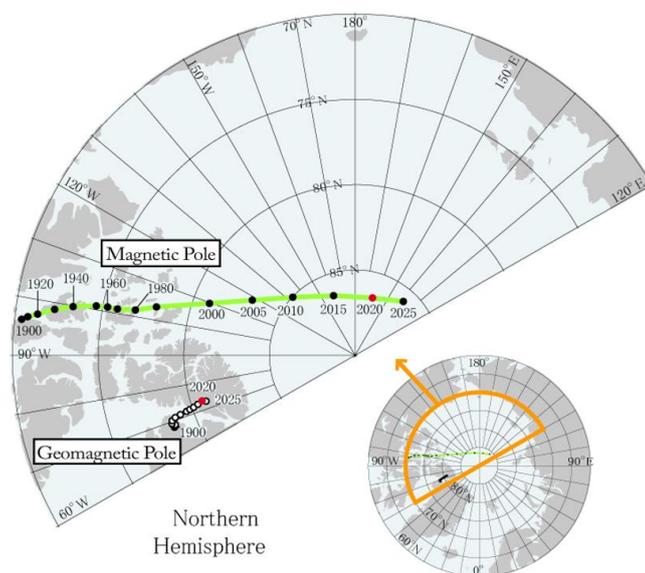
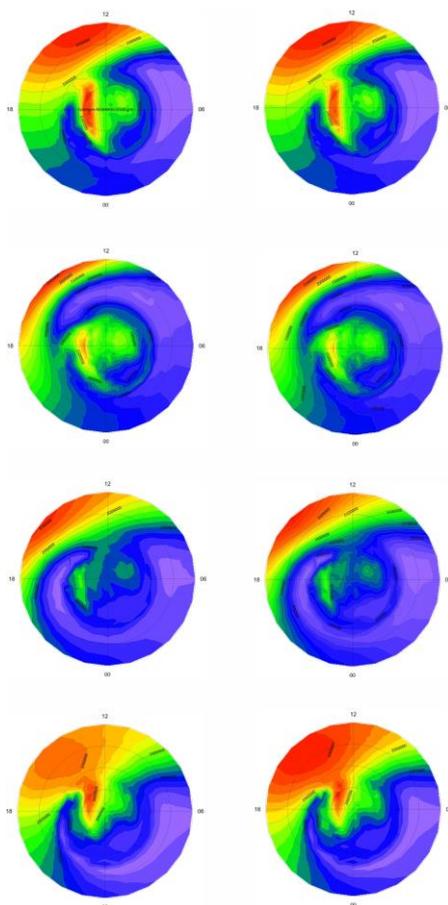


Рисунок 1. Траектории дрейфа магнитного и геомагнитного полюсов согласно [9].

Ниже, на рис. 2, приведены двумерные картины распределения электронной концентрации в максимуме слоя F2 для 1955 года (слева) и 2024 года (справа) для следующих гелиогеомагнитных условий: день года – 355, UT = 18,  $F_{10.7} = 220$ ,  $K_p = 0,3$ . Видно, что за период с 1955 по 2024 гг. качественных изменений в структуре изолиний не произошло, а количественные изменения незначительны. В распределении электронной концентрации с высотой также изменения незначительны.

Данные исследования следует продолжить при учете более детальной модели геомагнитного поля Земли. Однако, это потребует и соответствующей разработки метода учета поля коротации, очевидно более сложного по сравнению с предложенным в [10], где использовалась дипольная аппроксимация.

В заключение отметим, что несмотря на то, что с момента опубликования модели полярной ионосферы, рассмотренной в настоящей статье, прошло уже более трети века, модель остается вполне конкурентно способной и может быть использована в дальнейшем.



**Рисунок 2.** Изолинии  $N_{\max} F_2$  для 1955 (слева) и 2024 гг. для значений мирового времени UT = 00 (верхняя пара изолиний) и 06, 12 и 18 для нижележащих пар изолиний.

## Литература

1. Уваров В.М., Барашков П.Д., Захарова А.П. Модель полярной ионосферы с учетом влияния межпланетной среды. 1. Эффект азимутальной компоненты ММП // Геомагнетизм и аэрономия. 1992, Т. 32, № 3, с. 70 – 77.
2. Крупицкая Т.М., Уваров В.М., Чернин К.Е. Пространственно-временная структура траекторий конвекции ионосферной плазмы // Геомагнетизм и аэрономия. 1981, Т. 21, № 1, с. 187 – 189.
3. Уваров В.М., Барашков П.Д. Модель непрерывного распределения крупномасштабных электрических полей с учетом зависимости от Кр индекса. Препринт, Якутск, 1988. 12 с.
4. Уваров В.М., Барашков П.Д. Типы распределения электрических полей и соответствующие им типы конвекции в полярной ионосфере. Модель // Геомагнетизм и аэрономия. 1989, Т. 25, № 4, с. 621 – 628.
5. Уваров В.М. Электрические поля магнитосферной конвекции и структура полярной ионосферы. Автореферат диссертации на соискание степени доктора физико-математических наук. Петербург. 1994. 32 с.
6. Уваров В.М. Особенности структуры дневной полярной ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 2000, Т. 40, № 5, с. 45 – 51.
7. Barlier F., Berger C., Falin J., et al. A thermospheric model based on satellite drag data // Ann. Geophys. 1978, V. 1, N 1, p. 9 – 24.
8. Уваров В.М. Эволюция строения полярной ионосферы в ходе дрейфа магнитных полюсов Земли. Physics of Auroral Phenomena. V. 47, 2024, p. 128 – 130.
9. wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp
10. Quegan S., Bailey G.J., Moffett R.J., Wilkinson L.C. Universal time effect on plasma convection in the geomagnetic frame // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. 1986, V. 48, N 1, p. 25 – 40.