



# Двадцать вторая международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

## Оценка эффективности модели NeQuick 2 в условиях максимума солнечной активности на основе данных спутниковых измерений электронной концентрации

Б.А. Матюшин, В.И. Захаров, Н.А. Сухарева

Представлены результаты изучения систематических ошибок модели ионосферы NeQuick 2, проверка которой проводилась на данных спутниковых измерений электронной концентрации миссии ESA Swarm за 2014 год. В работе использованы измерения, проведенные зондами Ленгмюра, установленными на космических аппаратах указанной миссии, находящихся на орбитах выше уровня максимума F2 слоя. Данные 2014 года относятся к периоду максимума солнечной активности, в который были выделены с помощью анализа Kp и AE индексов периоды возбужденных и спокойных геомагнитных условий. Проведенные исследования позволили определить текущие и среднегодовые ошибки моделирования и их стандартные отклонения в различных широтных зонах и геомагнитных условиях, получить сезонную зависимость ошибок и пространственные распределения систематических отклонений модели от данных измерений, которые позволяют выделить области повышенных ошибок.

Модель NeQuick используется для расчетов, проводимых с целью коррекции задержки сигналов в ионосфере, но наши исследования показывают, что характерные текущие значения отклонений модели от in-situ измерений составляют от десятков процентов до сотен процентов в зависимости от географического положения и геомагнитных условий. Причем наибольшие отклонения наблюдаются в периоды геомагнитных бурь в экваториальных широтах и в полярных широтах южного полушария. По проведенному анализу сезонной зависимости ошибки моделирования, отмечено, что модель заметно хуже справляется с описанием в сезоны осень-зима в северном полушарии, что наблюдается как в увеличении среднемесячной ошибки, так и стандартного отклонения.

### Введение

Ионосфера Земли характеризуется значительной пространственно-временной изменчивостью, которая влияет на работу радиотехнических систем, точность навигации и связь, особенно в высоких широтах. В связи с этим крайне актуальной является задача создания и тестирования моделей ионосферы для эффективного описания текущего состояния и удовлетворительного прогнозирования ее параметров.

Целью настоящей работы стало проведение сравнения прямых измерений электронной концентрации, наблюдаемой на спутниках ESA (European Space Agency) Swarm и соответствующих им результатов расчетов NeQuick 2 в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях периода максимума солнечной активности 2014 года для различных географических регионов.

### Модель NeQuick 2

NeQuick – трехмерная, зависящая от времени, модель электронной концентрации, основанная на эмпирическом климатологическом представлении ионосферы, которая прогнозирует среднемесячную электронную концентрацию на основе аналитических профилей в зависимости от входных значений, связанных с солнечной активностью: количество солнечных пятен или солнечный поток, месяц, географическая широта и долгота, высота и всемирное время (UT) [1]. Верхняя часть ионосферы в модели представлена полупризматическим слоем с эмпирическим параметром толщины, зависящим от высоты. Такой слой для областей выше максимума слоя F2, представляется в следующем виде:

$$\begin{cases} N(h) = \frac{4NmF2}{(1 + \exp(z))^2} \exp(z) \\ z = \frac{h - hmF2}{H} \\ H = H_0 \left[ 1 + \frac{rg(h - hmF2)}{rH_0 + g(h - hmF2)} \right] \end{cases}$$

где  $N(h)$  – концентрация на высоте  $h$ ,  $NmF2$  – электронная концентрация в максимуме слоя F2,  $hmF2$  – высота слоя F2,  $H$  – параметр толщины слоя [2]

### Обработка данных и методы анализа

Отличие расчетов модели от усредненных измерений электронной концентрации на спутниках для различных широтных зон оценивалось по формуле средней абсолютной процентной ошибки:

$$\Delta = \frac{100}{N} \sum_i \left| \frac{N_{e_i}(NeQuick) - N_{e_i}(Swarm)}{N_{e_i}(Swarm)} \right|$$

### Геомагнитная активность и драйверы модели

В работе использованы различные индексы геомагнитной активности такие как Kp, AE и F10.7. Последний из них является драйвером модели.

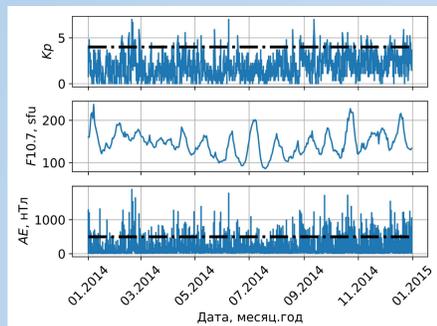


Рис.1 Геомагнитные индексы в течение 2014 года. Пороговые значения для определения дней высокой геомагнитной активности [3]: Kp > 4, AE > 500 нТл

### Результаты

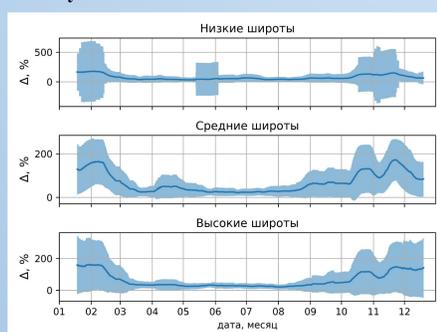
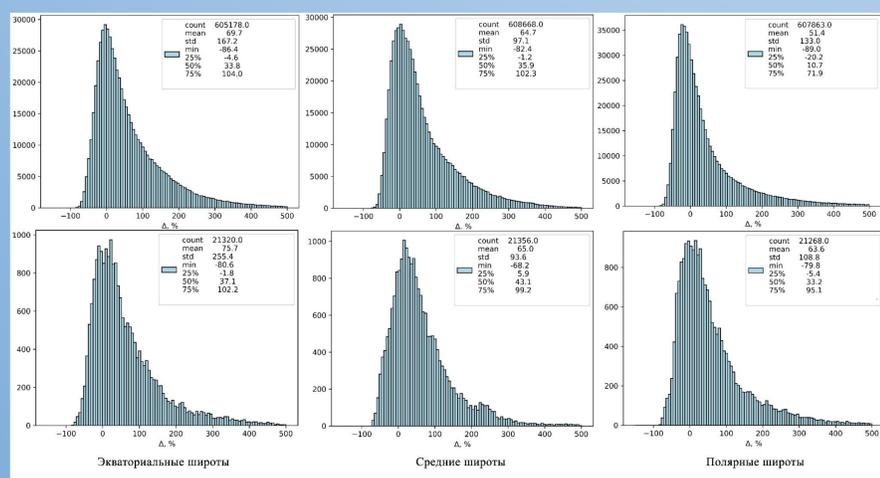


Рис. 2 Среднемесячные ошибки модели за 2014 года в северном полушарии на высоте 530 км.



В верхнем ряду на рис. 3 отображены распределения относительных ошибок для спокойных дней, а в нижнем для дней повышенной геомагнитной активности для северного полушария 2014 года на высоте 460 км.

	Экваториальные широты (0°–30°)	Средние широты (30°–60°)	Полярные широты (60°–90°)
Северное полушарие			
На высоте 530 км	76 ± 121	70 ± 83	69 ± 112
(Δ±σ), %	(81 ± 246)	(67 ± 71)	(69 ± 86)
На высоте 460 км	82 ± 161	75 ± 89	73 ± 122
(Δ±σ), %	(88 ± 252)	(75 ± 86)	(78 ± 99)
Южное полушарие			
На высоте 530 км	71 ± 133	72 ± 96	105 ± 196
(Δ±σ), %	(78 ± 112)	(80 ± 100)	(95 ± 124)
На высоте 460 км	82 ± 149	80 ± 108	117 ± 220
(Δ±σ), %	(77 ± 203)	(72 ± 112)	(89 ± 125)

В таб. 1 указаны среднегодовые ошибки и стандартные отклонения для различных широт в спокойных (возмущенных) геомагнитных условиях.

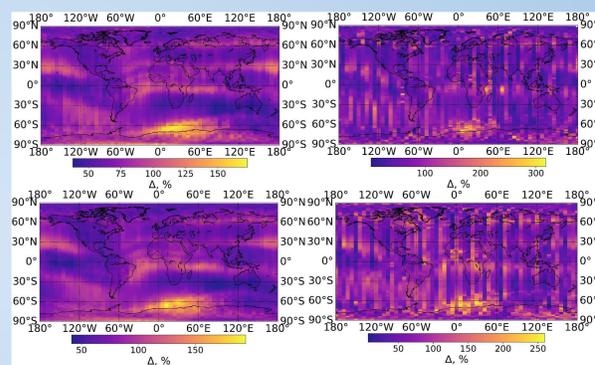
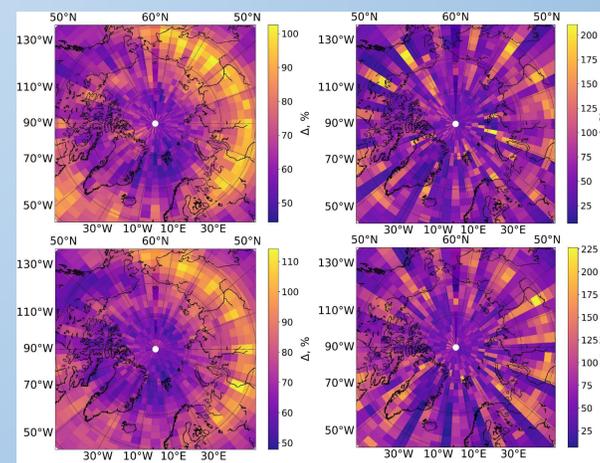


Рис.4 Глобальные карты средних абсолютных ошибок модели за 2014 год. Верхняя строка - высота 530 км, нижняя - высота 460 км. В левом столбце - спокойные условия, в правом - геомагнитно возмущенные.

Рис.5 Полярные карты средних абсолютных ошибок модели за 2014 год. Верхняя строка - высота 530 км, нижняя - высота 460 км. В левом столбце - спокойные условия, в правом - геомагнитно возмущенные.



### Заключение

- Среднегодовая абсолютная процентная ошибка модели NeQuick 2 составляет 70% – 80% в зависимости от широтной зоны. Характерные значения стандартных отклонений ошибки составляют 80% – 240%, причем наибольшие отклонения наблюдаются в периоды геомагнитных бурь в экваториальных широтах и в полярных широтах южного полушария. (Модель не предназначена для использования в возмущенных условиях и наша проверка связана исключительно с широкой применимостью модели)
- По проведенному анализу сезонной зависимости ошибки моделирования, можно заключить, что модель заметно хуже справляется с описанием в сезоны осень-зима, что наблюдается как в увеличении среднемесячной ошибки, так и стандартного отклонения.
- Стандартные отклонения ошибки возрастают в полярных и экваториальных областях вплоть до 220% и 252% соответственно, что связано в первую очередь со сложностью описания и моделирования процессов в верхней атмосфере и ионосфере, изучение которых продолжается в настоящее время.

Результаты работы позволяют оценить точность модели NeQuick 2 в различных геомагнитных условиях и областях широт. Это будет полезно для различных приложений, связанных с использованием ионосферы, например, для улучшения навигации и связи. Приведенные пространственные распределения отклонений помогут выделить направления будущих разработок по улучшению моделей ионосферы, что в свою очередь улучшит качество и обеспечит более надежную работу систем, которые на них основаны.

### Список литературы

- [1] [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/NeQuick\\_Ionospheric\\_Model](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/NeQuick_Ionospheric_Model)
- [2] B. Nava, P. Coisson, S.M. Radicella // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2008. 70. N 15. P. 1856–1862. doi:10.1016/j.jastp.2008.01.015
- [3] <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>

### Благодарности

Работа выполнена в рамках ГосЗадания МГУ им. М.В.Ломоносова по теме 01200408544 и при частичном финансировании по проекту «Научно-образовательные школы МГУ»  
Работа выполнена при поддержке гранта Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС»