

# МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕГУЛЯРНОЙ И НЕРЕГУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ ИОНОСФЕРЫ

Ясюкевич Ю.В.<sup>1</sup>, Жуков А.В.<sup>1,2</sup>, Быков А.Е.<sup>1</sup>, Ясюкевич А.С.<sup>1</sup>,  
Веснин А.М.<sup>1</sup>, Сидоров Д.Н.<sup>1,2</sup>

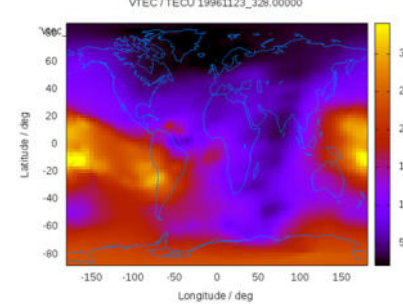
1 - Институт Солнечно-Земной Физики СО РАН, Россия, Иркутск, <http://iszf.irk.ru>  
2 - Институт Систем Энергетики им. Л.А. Мелентьева, <http://www.isu.ru>



## Аннотация

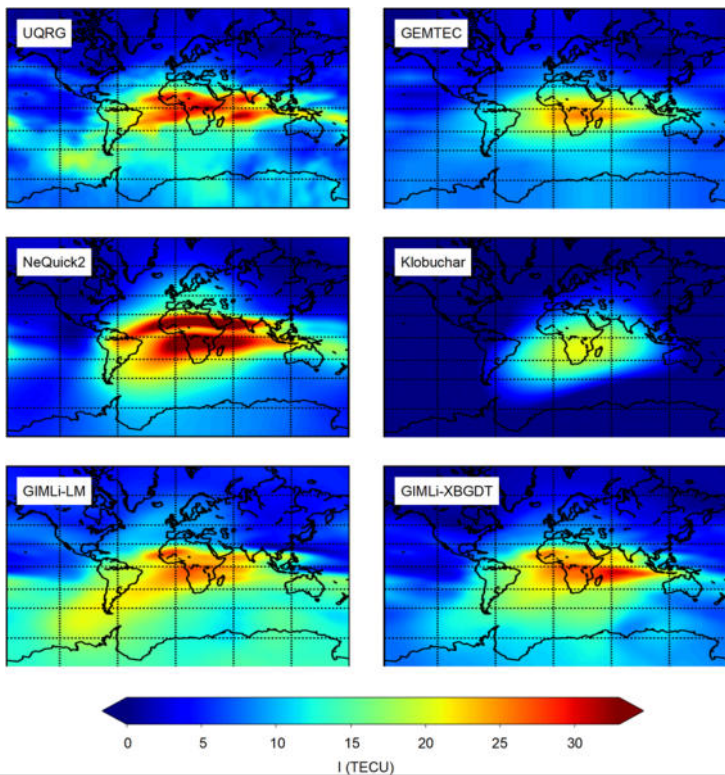
Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) обеспечивают возможность регулярного расчета глобальных ионосферных карт (ГИМ) полного электронного содержания. Временное разрешение современных карт ГИМ достигает 15 мин. Эти карты позволяют регулярную оценку регулярной динамики ионосферы и уровня ионосферной возмущенности в различном временном масштабе. Технологии машинного обучения (МО) позволяют создавать модели регулярной и нерегулярной динамики ионосферы. Общий объем данных для обучения/валидации/тестирования покрывает промежутки с 1998 по 2017 гг. В качестве входных используются индексы геомагнитной и солнечной активности. Нами использована технология градиентного бустинга для построения модели регулярной динамики и нейросетевая технология для модели нерегулярной динамики. Для уменьшения пространственной размерности и вычислительных затрат был использован метод естественных ортогональных функций.

## Глобальная ионосферная карта ПЭС UQRG

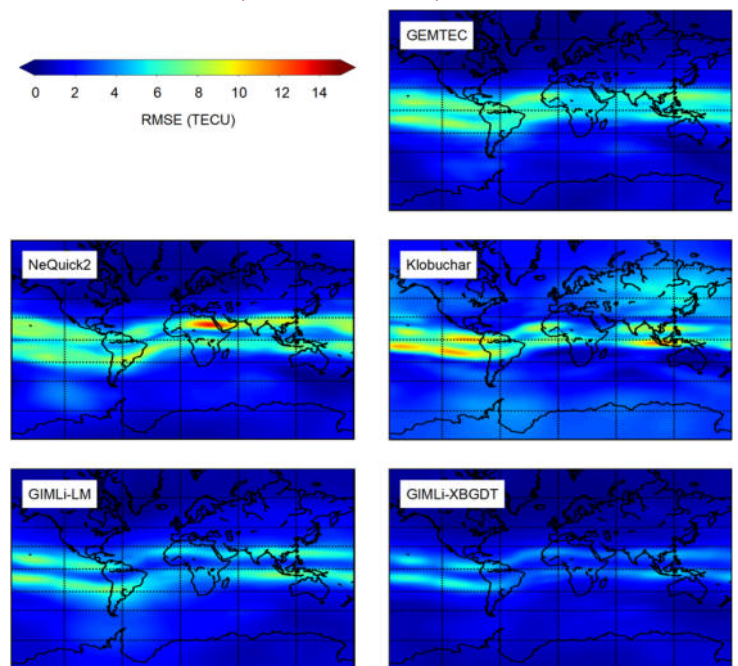


## Модель регулярной динамики

Примеры данных и прогнозирования ПЭС. 1 января 2017 г. 12 UT.

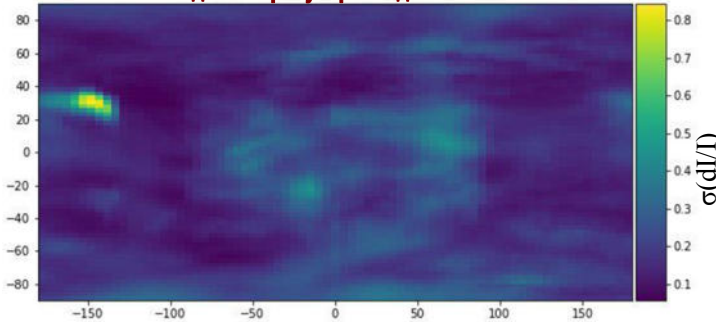


Усреднённая ошибка моделирования

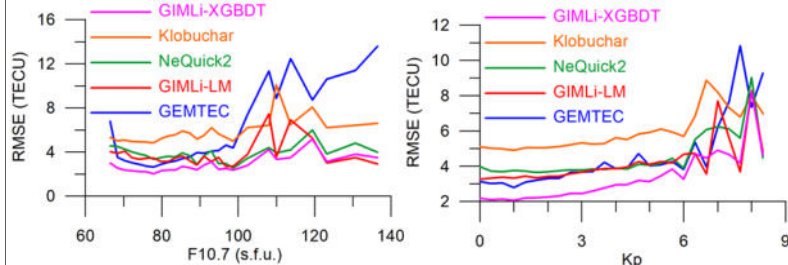


Максимальные ошибки расположены в области экваториальной аномалии. Созданная нелинейная модель GIMLI-XBDT характеризуется минимальными ошибками. Следует отметить повышенные ошибки модели Клобушара на территории РФ.

## Модель нерегулярной динамики



Ошибка модели, %



Нелинейная модель машинного обучения GIMLI-XBGDT практически полностью улавливает воздействие суточной активности, но как и остальные модели характеризуется ростом ошибки при увеличении Kp. Ошибка модели GEMTEC значительно растет при увеличении солнечной активности.

## Заключение

Машинное обучение – мощный инструмент для нелинейной аппроксимации. Построенная модель регулярной динамики по характеристикам показывает лучшее качество по сравнению с анализируемыми широко используемыми моделями. Глобальное усредненное среднеквадратическое отклонение и средняя абсолютная ошибки составляли: 2.5 TECU и 19% для нелинейной модели GIMLI-XBGDT, 4 TECU и 30-40% для моделей NeQuick2, GEMTEC, и GIMLI-LM, 5.2 TECU и 73% для модели Клобушара (GPS).

## Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№18-35-20038) и базового финансирования программы ФНИ П.16.

E-mail: [yasyukevich@iszf.irk.ru](mailto:yasyukevich@iszf.irk.ru); [yu.yasyukevich@gnss-lab.org](mailto:yu.yasyukevich@gnss-lab.org)