

## МОДЕЛЬ ДЛЯ МОНИТОРИНГА АВРОРАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ ГНСС, ПОСТРОЕННАЯ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ RANDOM FOREST

С.А. Серебrenникова

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения СО РАН, Иркутск, Россия  
sova@mail.iszf.irk.ru

## A MODEL FOR MONITORING AURORAL ACTIVITY USING GNSS DATA, BUILT ON THE BASIS OF RANDOM FOREST MACHINE LEARNING ALGORITHM

S.A. Serebrennikova

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia  
sova@mail.iszf.irk.ru

**Аннотация.** Оценка поступающей в магнитосферу энергии в области аврорального овала является актуальной задачей. В работе показан подход к решению данной задачи, основанный на использовании данных ГНСС для построения модели двумерного распределения плотности энергии, поступающей в магнитосферу в области аврорального овала, в рамках алгоритма машинного обучения Random Forest. Особенностью подхода является применение машинного обучения к экспериментальным данным спутников DMSP.

**Ключевые слова:** ГНСС, ионосферные карты, авроральный овал, TEC, ROTI, DMSP, машинное обучение, Random Forest.

**Abstract.** Assessing energy entering the magnetosphere in the area of the auroral oval is an important problem. This paper presents the approach to solving this problem with the use of GNSS data for building a model of two-dimensional distribution of density of the energy entering the magnetosphere in the auroral oval region within the framework of Random Forest machine learning algorithm. A distinguishing feature of this approach is the application of machine learning to experimental data from DMSP satellites.

**Keywords:** GNSS, ionospheric maps, auroral oval, TEC, ROTI, DMSP, machine learning, Random Forest.

### ВВЕДЕНИЕ

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), такие как GPS/ГЛОНАСС/Galileo, в последние годы предоставляют обширный материал для изучения ионосферы Земли [Afraimovich et al., 2013]. Появляются сервисы, позволяющие на основе данных ГНСС осуществлять наблюдения ионосферы и ионосферных неоднородностей в глобальном и региональном масштабе. В частности, можно отметить глобальные ионосферные карты полного электронного содержания (ПЭС) [Hernandez-Pajares et al., 2009] и карты ROTI [Cherniak et al., 2018].

Карты вариаций ПЭС указывают на постоянное присутствие ионосферных неоднородностей в области аврорального овала, а динамика области ионосферных неоднородностей соответствует динамике аврорального овала [Prikryl et al., 2013]. При этом можно ожидать, что интенсивность этих неоднородностей будет определяться поступающей в магнитосферу энергией. Это указывает на потенциальную возможность оценки положения границы аврорального овала и распределения поступающей энергии на основе данных ГНСС. Таким образом, сеть ГНСС можно использовать как детектор возмущений при мониторинге процессов в авроральной области Северного, так и Южного полушария.

Задача моделирования и прогноза положения аврорального овала достаточно сложна, а ее актуальность определяется значительным ухудшением качества работы радарных, навигационных и связных систем в этой области [Hunsucker, Hargreaves, 2007]. Для моделирования положения аврорального овала могут использоваться экспериментальные данные со спутников DMSP. DMSP — это спутники оборонной метеорологической программы, представляю-

щие собой серию низковысотных (~850 км) космических аппаратов. В данной работе использовались датчики SUSSI и SSJ, данные осадков частиц в зоне авроральных высыпаний: электронная и ионная плотности энергии.

### ЦЕЛЬ И ЗАДАЧА РАБОТЫ

Целью исследования являлась оценка интенсивности и границ авроральных высыпаний на основе данных GPS и ГЛОНАСС. Использовался подход машинного обучения Random Forest (RF) для создания модели распределения поступающей в магнитосферу энергии в области авроральных высыпаний и последующего мониторинга их активности. Отличие данного подхода от других моделей, рассчитывающих положение и мощность аврорального овала, состоит в том, что в качестве входных данных модели используются только данные ГНСС. Таким образом, потенциально можно осуществлять мониторинг авроральной активности в режиме реального времени.

### МЕТОДИКА

В работе Random Forest решает регрессионную задачу для определения зависимости между данными ГНСС и мощностью авроральных высыпаний и их границей.

На первом этапе необходимо сделать выборку данных. В качестве входных данных модели использовались 2–10-минутные вариации ПЭС и данные ROTI, рассчитываемые системой обработки ГНСС-данных SIMuRG. В качестве реперных значений использовалась плотность энергии электронов и ионов по данным спутников DMSP для Северного и Южного полушария.

На втором этапе возникает необходимость согласовывать системы координат карт ГНСС и DMSP, поскольку шаг изменения угла по широте и долготе в сетке координат у них отличается. Для этой цели используется метод скользящего окна, т.е. используется окно с определенным размером  $R$  (градусом географической широты и долготы).

Проходя окном по всей карте и центрируясь на реперном значении плотности энергии (электронной или ионной), берем внутри этого окна распределение TEC(ROTI) как среднее и вычисляем статистические характеристики этой операции.

На третьем этапе происходит обучение модели с помощью сформированной обучающей выборки с согласованной системой координат.

И заключительным этапом является анализ корректности и качества работы модели на независимой от обучающей тестовой выборке для получения двумерного распределения энергии в области авроральных высыпаний

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанная эмпирическая модель на основе машинного обучения, позволяет на базе карт вариаций TEC и данных ROTI получать распределение энергетического потока в области авроральных высыпаний как в Северном, так и в Южном полушарии. Экспериментально установлено, что для улучшения описания потока энергии в области авроральных высыпаний необходимо использовать в обучающей выборке большое количество дней и не только разделять данные по уровню геомагнитной активности на основе  $K_p$ -индекса, но и учитывать сезонность с пиком и спадом авроральной активности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., et al. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic process and phenomena. *J. Space Weather Space Clim.* 2013. Vol. 3, A27. DOI: [10.1051/swsc/2013049](https://doi.org/10.1051/swsc/2013049).
- Cherniak I., Krankowski A., Zakharenkova I. ROTI Maps: a new IGS ionospheric product characterizing the ionospheric irregularities occurrence. *GPS Solutions.* 2018. Vol. 22, no. 3. 69 p. DOI: [10.1007/s10291-018-0730-1](https://doi.org/10.1007/s10291-018-0730-1).
- Hernandez-Pajares M., Juan J.M., Sanz J., et al. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998 // *J. Geodesy.* 2009. Vol. 83, no. 3-4. P. 263–275.
- Hunsucker R.D., Hargreaves J.K. The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation. Cambridge University Press, 2007.
- Prikryl P., Zhang Y., Ebihara Y., et al. An interhemispheric comparison of GPS phase scintillation with auroral emission observed at the South Pole and from the DMSP satellite. *Ann. Geophys.* 2013. Vol. 56, no. 2. R0216. DOI: [10.4401/ag-6227](https://doi.org/10.4401/ag-6227).