

*Иванов Игорь Сергеевич, студент, Уфимский государственный авиационный  
технический университет, г. Уфа*

## **ЛИНЕЙНАЯ РЕГРЕССИЯ КАК МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ И РЕТРОСПЕКТИВНОГО ПРОГНОЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ**

**Аннотация:** В статье рассматривается линейная регрессия как метод восстановления и ретроспективного прогноза временных рядов геоиндуцированных токов. Были рассмотрены различные модели машинного обучения, для решения проблемы, при которой геомагнитное поле вызывает геоиндуцированные токи на линиях электропередач, на электростанциях и других источниках электрического питания. Проведено исследование с оценкой точности моделей машинного обучения, проведено сравнение моделей по некоторым критериям, а также предложена модель с наиболее точным показателем спрогнозированного геоиндуцированного тока.

**Ключевые слова:** геомагнитное поле, геомагнитные бури, геоиндуцированные токи, машинное обучение, линейная регрессия.

**Annotation:** The article discusses linear regression as a method for recovering and retrospective forecasting of time series of geinduced currents. Various machine learning models were considered to solve the problem in which the geomagnetic field causes geinduced currents on power lines, power plants and other sources of electrical power. A study was carried out with an assessment of the accuracy of machine learning models, a comparison of the models was carried out according to some criteria, and a model with the most accurate indicator of the predicted geinduced current was proposed.

**Keywords:** geomagnetic field, geomagnetic storms, geinduced currents, machine learning, linear regression.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Геомагнитная буря является возмущением геомагнитного поля длительностью от нескольких часов до нескольких суток [1]. Доказано [2], что данное явление вызывает геоиндуцированные токи (ГИТ) в проводящих технологических конструкциях (трубопроводах, линиях электропередач (ЛЭП), трансокеанских кабелях, системах автоматики железных дорог и др.), которые влекут за собой аварийные ситуации в энергетических системах (линии электропередач — ЛЭП, релейные линии, трансформаторные подстанции) [3]. Так, в заземленных сетях во время геомагнитных бурь (ГМБ) наблюдались ГИТ до 200-300 А, когда токов с интенсивностью всего несколько ампер достаточно, чтобы вывести некоторые типы трансформаторов из линейного режима. Магнитная буря 13 марта 1989 г. явилась причиной выхода из строя силовых трансформаторов и каскадного отключения (блэкаута) линий электропередачи (ЛЭП) более, чем на 9 часов в провинции Квебек (Канада)[4].

В связи с этим прогнозирование геоиндуцированных токов при геомагнитных бурях около силовых трансформаторов в энергетических системах является актуальным, поскольку знание показателя ГИТ во время геомагнитных бурь на энергетических системах позволит в некоторой степени контролировать ГМБ, а также минимизировать ущерб, нанесенный ГМБ на энергетических системах. В рамках данного исследования будут протестированы некоторые модели машинного обучения для наиболее точного прогноза геоиндуцированных токов основываясь на показателях вариации геомагнитного поля.

## **ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ**

Для обучения модели машинного обучения были взяты данные возмущений геоиндуцированных токов на ЛЭП в пункте «Выходной» (VKH) (географические координаты 68.83° N, 33.08° E), регистрация ГИТ происходит с

разрешением по времени в 1 минуту. Поскольку в близости с данным пунктом наблюдения вариация геомагнитного поля невозможны, использованы данные магнитных станций IMAGE [[www.geo.fmi.fi/image](http://www.geo.fmi.fi/image)]. Использованы данные магнитных обсерваторий, ближайших к ГИТ-станции: IVA (географические координаты 68.56° N, 27.29° E, удаление 236 км), KEV (69.76° N, 27.01° E, удаление 260 км), SOD (67.37° N, 26.63° E, удаление 313 км) и АВК (68.35° N, 18.82° E, удаление 580 км) (с разрешением по времени в 1 минуту). Также в качестве характеристик космической погоды были использованы индексы АЕ, суббуревой SME и PCN (с разрешением по времени в 1 минуту). АЕ-индекс характеризует магнитную возмущенность в зоне в целом, безотносительно к месту появления возмущения. PCN-индекс характеризует геомагнитные возмущения в полярной шапке, обусловленные воздействием солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на магнитосферу Земли.

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ

В рамках данной статьи для сравнения и выбора оптимальной модели машинного обучения были протестированы следующие алгоритмы линейной регрессии: линейная регрессия с L1-регуляризацией (регрессия наименьших углов, Lasso), линейная регрессия с L2-регуляризацией (гребневая регрессия, Ridge), а также линейная регрессия, сочетающая в себе L1 и L2 регуляризации (ElasticNet). Для построения моделей линейной регрессии была использована библиотека Python – Scikit Learn [[https://scikit-learn.org/stable/modules/linear\\_model.html](https://scikit-learn.org/stable/modules/linear_model.html)].

Для высокой точности прогноза значения разрешения по времени в 1 минуту были усреднены до 15 минут. Точность прогноза каждой модели оценивалась по формуле средней квадратической ошибки (MSE)(формула 1).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1)$$

n – количество элементов;

y – спрогнозированные данные;

$\hat{y}$  – фактические данные.

В результате тестирования моделей на всех имеющихся данных мы пришли к следующим значениям MSE: Lasso – 0.2224, Ridge и ElasticNet – 0.1193. Регрессия с L1-регуляризацией из-за своей спецификации обнуляла минимальные коэффициенты, в следствии чего мы получаем снижение в точности прогноза. Алгоритм модели ElasticNet в большей степени (75%) основывался на L2-регуляризации, что делает его альтернативой Ridge-регрессии, отсюда исходит приблизительно одинаковые значения точности моделей. Таким образом можно прийти к выводу, что среди данных моделей машинного обучения наиболее подходящим может считаться модель Ridge-регрессии, поскольку L1-регуляризация снижает точность прогноза ГИТ.

17-18 марта 2015 года произошла геомагнитная буря в следствии чего значения ГИТ достигали отметки в 50 А, при таких значениях ГИТ могут выйти из строя элементы энергетической системы. Модель гребневой регрессии спрогнозировала ГИТ по данным вариаций геомагнитного поля, результат прогноза регрессии представлен на рисунке 1.

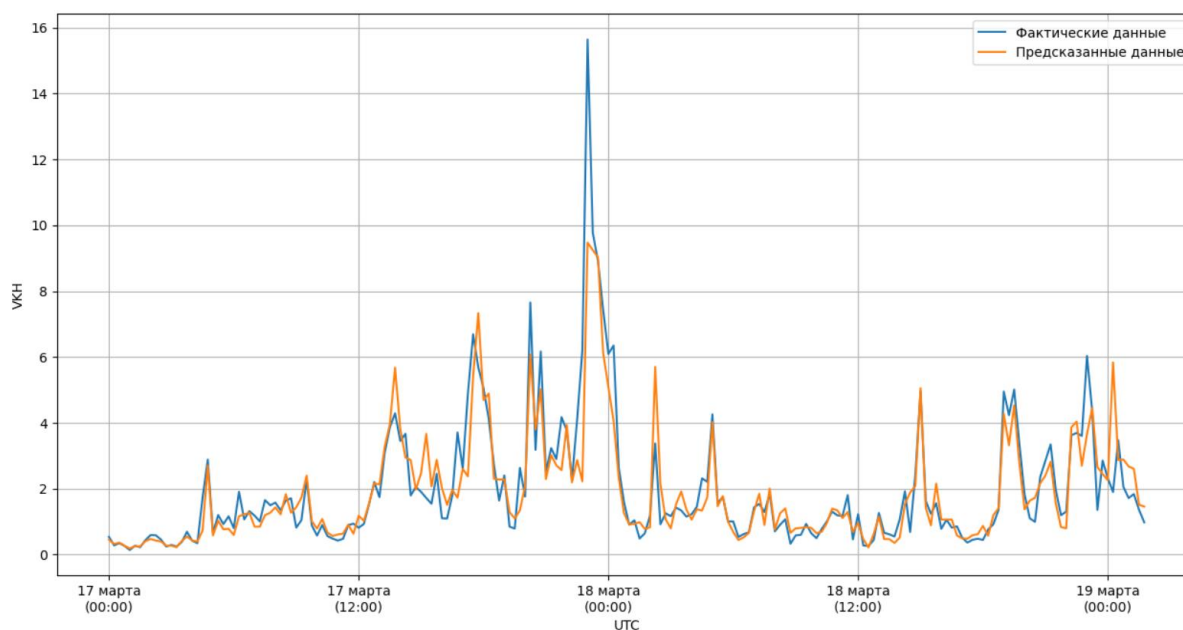


Рисунок 1 – График прогноза геоиндуцированных токов

По графику видно, что модель прогнозирует ГИТ во время данной геомагнитной бури со средней точностью. Большая погрешность в точности ГИТ можно заметить в конце 17 марта, когда ГИТ на станции VKN достигала пикового значения в 16 А.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Таким образом в ходе данного исследования были протестированы 3 модели машинного обучения, была выявлена их среднеквадратическая точность и предложена модель с наиболее низким показателем MSE. Также модель была протестирована на геомагнитной буре 17-18 марта 2015 года.

### **Библиографический список:**

1. Воробьев А.В., Пилипенко В.А., Еникеев Т.А., Воробьева Г.Р., Христовуло О.И. Система динамической визуализации геомагнитных возмущений по данным наземных магнитных станций Научная визуализация. 2021. Т. 13. № 1. С. 162-176.
2. Воробьев А.В., Пилипенко В.А., Еникеев Т.А., Воробьева Г.Р. Геоинформационная система для анализа динамики экстремальных геомагнитных возмущений по данным наблюдений наземных станций Компьютерная оптика. 2020. Т. 44. № 5. С. 782-790.
3. Воробьев А.В., Пилипенко В.А., Решетников А.Г., Воробьева Г.Р., Белов М.Д. Веб-ориентированная визуализация геофизических параметров в области аврорального овала Научная визуализация. 2020. Т. 12. № 3. С. 108-118.
4. Воробьев А.В., Воробьева Г.Р. Визуализация геомагнитных вариаций в частотно-временной области информационного сигнала Научная визуализация. 2019. Т. 11. № 2. С. 143-155.