

УДК 551.510.535

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОИСКА И ОБНАРУЖЕНИЯ ЭФФЕКТОВ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В ВАРИАЦИЯХ АМПЛИТУДЫ СДВ-СИГНАЛОВ

Х.Х.З. Нгуен, А.С. Полетаев

Иркутский национальный исследовательский технический университет
hd04011996@gmail.com

DEVELOPING OF A METHOD FOR SEARCHING AND DETECTING THE SOLAR FLARE EFFECTS IN AMPLITUDE VARIATIONS OF VLF SIGNALS

K.H.D. Nguyen, A.S. Poletaev

Irkutsk National Research Technical University
hd04011996@gmail.com

Аннотация. Приведена статистика влияния солнечных вспышек на параметры СДВ-радиосигналов за 5 лет с 2015 по 2020 г. В работе выполнены обработка и анализ данных о распространении СДВ-радиоволн на трассе JJ1 (Япония, 22.2 кГц) — Иркутск (пункт приема п. Теплоэнергетик). Разработаны программы для автоматизации поиска и обнаружения эффектов солнечных вспышек в вариациях амплитуды СДВ-сигналов с использованием метода линейной регрессии. Показана эффективность способа и оценена вероятность обнаружения солнечных вспышек при помощи разработанного метода.

Ключевые слова: СДВ, ионосфера, солнечные вспышки, линейная регрессия, нейронная сеть.

Abstract. This paper presents statistics of the effect of solar flares on the parameters of VLF radio signals during a five-year period from 2015 to 2020. The paper also shows results of processing and data analysis on VLF signals propagating over the path JJ1 (Japan, 22.2 kHz) —Irkutsk (receiving station Teploenergetik). Programs have been developed to make the search and detection of solar flare effects in amplitude variations of VLF signals automatic by using the linear regression method. The effectiveness of the developed method is assessed.

Keywords: VLF, ionosphere, solar flares, linear regression, artificial neural network.

ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера является ионизированной областью атмосферы, расположенной выше 60 км, где концентрация электронов такова, что начинает влиять на распространение радиоволн. Ионизация атмосферы происходит главным образом вследствие воздействия солнечного ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Для дистанционного мониторинга возмущений в нижней ионосфере часто используют сигналы низкочастотных радиостанций, на которые влияют множество факторов: суточные и сезонные изменения угла падения ионизирующего излучения Солнца, солнечные вспышки, магнитные бури, вторжение магнитосферных частиц и др.

Наблюдения влияния солнечных вспышек на СДВ-сигналы

Для обнаружения возмущений в нижних слоях ионосферы используют данные о распространении сверхдлинных волн (СДВ) [Cohen et al., 2018]. Для этого диапазона наблюдаются заметные изменения амплитудно-фазовых характеристик сигналов во время солнечных вспышек. Основным фактором, оказывающим влияние на параметры СДВ-сигнала в волноводе Земля – ионосфера, являются увеличение концентрации электронов в нижних слоях ионосферы и изменение высоты верхней стенки волновода. Результаты исследований показывают, что при мощных гелиогеофизических возмущениях, в том числе рентгеновских вспышках, ионизация D-области может возрастать значительно, а СДВ-сигналы претерпевают существенные изменения [Нестеров, 2021].

Для обработки и анализа экспериментальных данных распространения СДВ выбраны трассы JJ1 (Япония) – Иркутск (пункт приема п. Теплоэнергетик), NWC (Австралия) – Иркутск (п. Теплоэнергетик) [Yadrennikova et al., 2018]. Японская станция передает сигнал на частоте 22.2 кГц, мощность передатчика составляет 500 Вт, а протяженность трассы — 3080 км. Австралийская станция NWC передает сигнал на частоте 19.8 кГц при мощности передатчика в 1 МВт. Это самая мощная передающая станция в Южном полушарии. Длина трассы составляет 8260 км. На рис. 1 показаны вариации амплитуды сигнала JJ1, зарегистрированные в п. Теплоэнергетик во время солнечной вспышки 2 апреля 2017 г. Видно резкое повышение уровня сигнала во время солнечной вспышки. Предшествующий день 01.04.2017 характеризуется спокойными условиями распространения сигнала.

Для проведения статистического анализа выбраны данные за пять лет с 2015 по 2020 г. Всего было рассмотрено 2139 вспышек. На рис. 2 показано распределение всех рассмотренных вспышек и отмечено количество событий, которые вызвали возмущения амплитуды СДВ-радиосигналов, распространяющихся по трассам Австралия — Теплоэнергетик и Япония — Теплоэнергетик.

Резкое уменьшение и постепенное увеличение количества вспышек за год на рис. 2 связано с 11-летним солнечным циклом. В 2018 г. наблюдался минимум 24-го солнечного цикла, в 2019 г. начался новый, 25-й цикл солнечной активности. Наибольшее количество событий (~91 %) приходится на слабые вспышки класса C. Из статистических данных следует

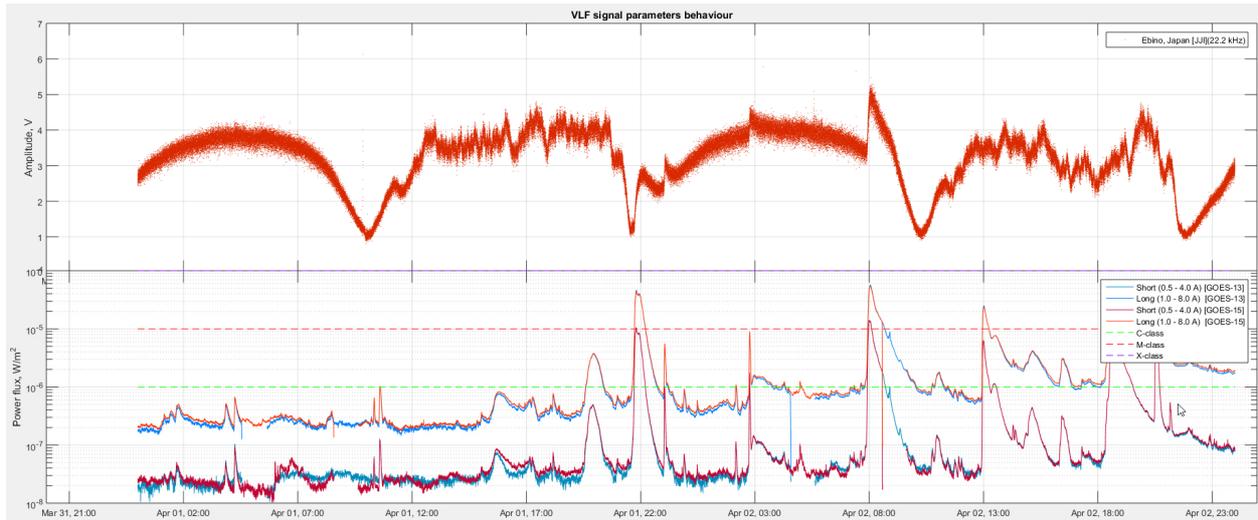


Рис. 1. Воздействие вспышки на амплитуду СДВ-сигнала станции JJ по данным наблюдения в п. Теплоэнергетик 2 апреля 2017 г.: верхняя панель — вариации амплитуды сигнала, нижняя панель — рентгеновское излучение по данным GOES-13, -15

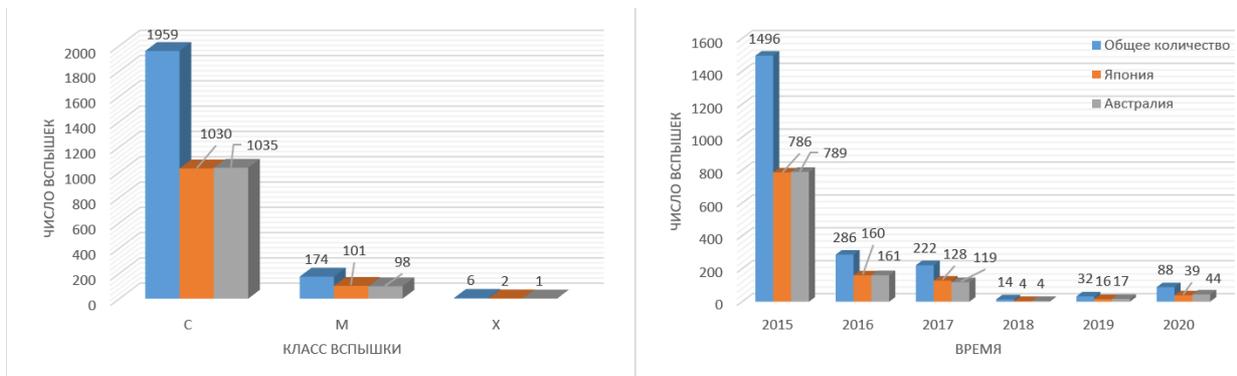


Рис. 2. Распределение вспышек за пять лет и попадание вспышек в дневное время на трассах Австралия – Теплоэнергетик и Япония – Теплоэнергетик: левая панель — распределение по классам вспышек, правая панель — распределение по годам

что даже для двух трасс требуется просмотреть очень большое количество событий, поэтому для количественной оценки влияния вспышек необходима автоматизация поиска и обнаружения солнечных вспышек в экспериментальных данных.

Применение методов линейной регрессии и машинного обучения для обработки экспериментальных данных

Для анализа и обработки данных использован метод линейной регрессии, аппроксимирующий выборки линейной функцией вида $y = Ax + B$, где A — наклон линии, а B — сдвиг по оси Y . Данные по амплитуде были разбиты на фрагменты длительностью 60 мин, каждый фрагмент сдвигается на интервал 10 мин. При этом соседние фрагменты оказываются наложенными друг на друга, что обеспечивает плавное изменение коэффициентов линейной функции. На рис. 3 показаны сигнал в спокойный день (а), сигнал 22.2 кГц, принятый 2 апреля 2017 г. (б) и изменение коэффициентов наклона A , полученных методом линейной регрессии (в). Полученная функция для коэффициента A хорошо коррелирует со всплесками амплитуды во время солнечных вспышек, практически отсутствует влияние на

результат выбросов измеренных значений амплитуды из-за шумов и импульсных помех. Далее коэффициенты A и B поступают в искусственную нейронную сеть, обнаруживающую аномальные отклонения их значений.

Автоматизация поиска обнаружения солнечных вспышек

Для автоматизации поиска обнаружения солнечных вспышек было выбрана среда программирования Python, в которой есть много модулей и библиотек для машинного обучения, в том числе Scikit-learn, TensorFlow. Для решения поставленной задачи были подготовлены данные для обучения. Данные были выбраны за период с 18 марта по 16 апреля 2017 г. В этом периоде были ранее обнаружены восемь вспышек в течение четырех дней (28 марта, 2, 3 и 4 апреля). В результате выполнения программы рассчитаны коэффициенты A и B , отклонения которых свидетельствуют о наличии вспышек. На рис. 4 приведены примеры расчетов, цветом показаны разные фрагменты данных. Видно, что зависимости $A(B)$ для спокойного дня и дня со вспышками (панели в, г) сильно различаются.

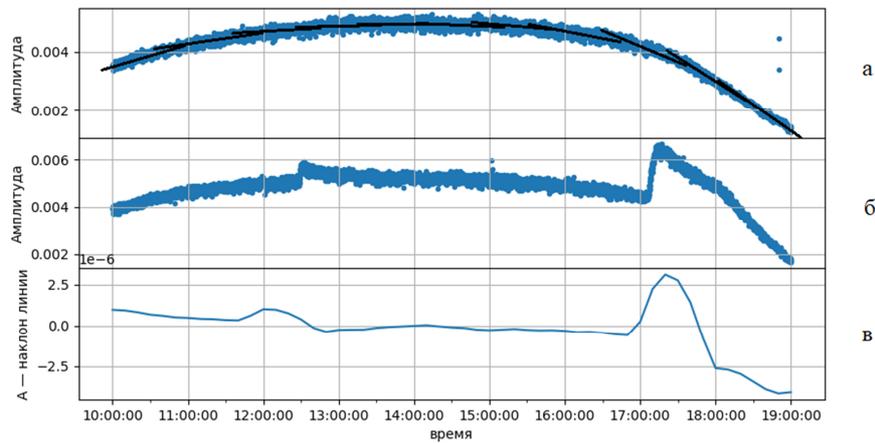


Рис. 3. Обработка данных с применением линейной регрессии: а — сигнал в спокойный день с разбивкой на фрагменты и линейной аппроксимацией; б — сигнал в день с солнечными вспышками; в — коэффициент A уравнения линейной регрессии

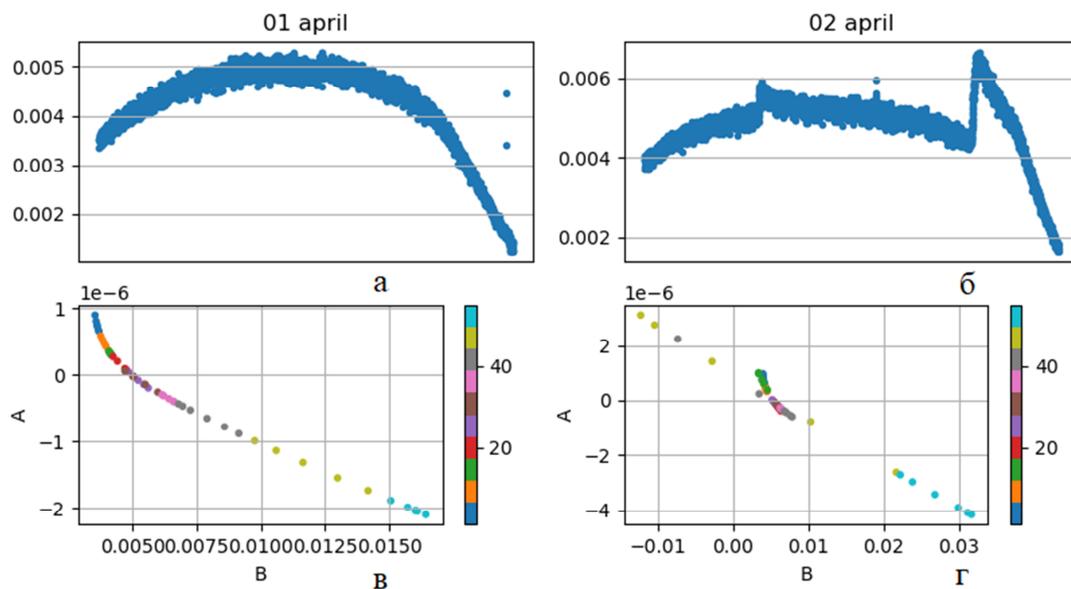


Рис. 4. Результаты автоматизированного поиска вспышек: а, б — образцы данных 1 и 2 апреля 2017 г.; в, г — соотношение коэффициентов A и B

Для обучения нейронной сети были использованы 20 из 28 дней выбранного периода, для которых были данные измерений. В обучающей выборке были два дня со вспышками (28 марта — 1 вспышка, 2 апреля — 2 вспышки), остальные дни — спокойные. Оставшиеся восемь дней (3 апреля — 4 вспышки, 4 апреля — 1 вспышка) были использованы для тестирования нейронной сети. В результате тестирования обученной модели были обнаружены три вспышки из пяти (60 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование метода линейной регрессии позволило получить более наглядное представление эффектов солнечных вспышек. Представленная методика удобна для автоматизированной обработки и анализа данных по распространению СДВ-сигнала. Статистика показывает, что применение машинного обучения для обнаружения солнечных вспышек дает достаточно высокий результат (60 %). В дальнейшем будет проводиться работа по обучению

нейронной сети на значительно большем объеме экспериментальных данных с целью повышения доли обнаруживаемых вспышек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Нестеров В.И. Влияние внезапных ионосферных возмущений на D-область ионосферы. *Физика: Фундаментальные и прикладные исследования, образование. XIX региональная научная конференция: Труды*. Благовещенск, 2021. С. 115–117.
- Cohen M.B., Said R.K., Paschal E. W., et. al. Broadband longwave radio remote sensing instrumentation. *Rev. Scientific Instruments*. 2018. Vol. 89, 094501.
- Yadrennikova O.V., Poletaev A.S., Chensky A.G. Influence of Solar Flares on VLF Radio Waves Propagation over JJI — Irkutsk Path. *APEIE-2018*. Novosibirsk, October 2–6, 2018. Vol. 1, Pt. 3. P. 137–140.