

Крымов Виталий Анатольевич¹,
магистрант, бакалавр;
Рудовская София Владимировна²,
магистрант, бакалавр;
Теплова Наталья Витальевна³,
канд. физ-мат. наук, доцент

ОБНАРУЖЕНИЕ ВСПЫШЕК В СИГНАЛЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕЧЕНИЯ ВОДОРОДНОЙ ЛИНИИ ПО ДАННЫМ С ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2

^{1, 2, 3} Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия,

¹ krimvit@yandex.ru, ² rudovskaya.sofia@yandex.ru, ³ nataly239@mail.ru

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Разработан алгоритм обнаружения вспышек по данным с токамака Глобус-М2, необходимый при решении задач управляемого термоядерного синтеза. Показан метод, позволяющий отличить вспышку от выброса на основе анализа конечных разностей. Приведены графические иллюстрации на примере одного из экспериментальных разрядов. В основу алгоритма положены базовые принципы статистики, понятие робастности и основы системного анализа. Алгоритм реализован на языке статистической обработки данных R.

Ключевые слова: токамак, Глобус-М2, выброс, вспышка, физика плазмы, R, водородная линия.

Vitaliy A. Krymov¹,
Master Student, BSc;
Sofia V. Rugovskaya²,
Master Student, BSc;
Natalya V. Teplova³,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor

FLASH DETECTION IN THE HYDROGEN LINE LIGHT INTENSITY SIGNAL ACCORDING TO DATA FROM THE GLOBUS-M2 TOKAMAK

^{1, 2, 3} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia,

¹ krimvit@yandex.ru, ² rudovskaya.sofia@yandex.ru, ³ nataly239@mail.ru

³ Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, Russia

Abstract. An algorithm for bursts detecting based of data obtained from the Globus-M2 tokamak, essential for solving problems of controlled thermonuclear fusion, is developed. A method shown distinguishes a burst from blowout based on the finite difference analysis. Graphic illustrations are given for the example of one of the experimental discharges. The algorithm is based on the basic principles of statistics, the concept of robustness and the foundations of system analysis. The algorithm is implemented in the language of statistical data processing R.

Keywords: tokamak, Globus-M2, outlier, flash, plasma physics, R, hydrogen line.

Введение

Управляемый термоядерный синтез (УТС) ставит амбициозную научно-техническую задачу, предлагая решение проблемы нехватки невозобновляемых энергетических ресурсов [1].

Управляемый термоядерный синтез представляет собой синтез более тяжелых атомных ядер из более легких с целью получения энергии. В настоящее время наиболее перспективным представляется применение дейтерия и трития в указанных реакций, а также, в более отдаленной перспективе, гелия-3.

Проблема указанного синтеза заключается в том, что одним из условий его существования является преодоление кулоновских сил отталкивания между одинаково заряженными частицами.

Указанное преодоление возможно в том случае, когда температура плазмы, содержащая атомы, будет более 10⁸ кельвинов, что составляет примерно 100 миллионов градусов Цельсия для реакции дейтерия и трития.

Наиболее трудной в настоящее время является задача изоляции плазмы от стенок реактора. Это требуется для достижения устойчивости системы. Под устойчивостью будем понимать способность возвращаться в состояние равновесия после того, как система была выведена из этого состояния под влиянием внешних или внутренних воздействий [3]. С этой целью были построены токамаки – тороидальные камеры с магнитными катушками. Магнитное поле, генерируемое токамаками, нагревает и удерживает плазму при относительно низком давлении и высокой температуре.

В настоящее время в процессе экспериментов на токамаках наблюдаются явления выбросов и вспышек в сигнале интенсивности свечения водородной линии. Подобные вспышки и выбросы могут приводить к срыву разряда, что делает невозможным применение токамаков в промышленном масштабе.

Целью работы является разработка алгоритма, способного обнаруживать вспышки и выбросы в подобных сигналах и дифференцировать их между собой.

Актуальность работы связана с поиском в научном сообществе способов и методов обнаружения вспышек, выбросов и установления зако-

номерностей их появления для предотвращения и продвижения в области термоядерного синтеза [4]. В дальнейшем предполагается определение взаимосвязи вспышек в сигнале свечения водородной линии и пилообразных колебаний.

В качестве объекта рассмотрены экспериментальные данные, полученные с установки токамака Глобус-М2.

В качестве предмета выбран d-alpha сигнал разряда 36612.

Постановка задачи

Пусть дана дискретная функция $f_k \in \mathbb{R}$, определённая формулой (1) и показывающая уровень напряжения U альфа-канала токамака.

$$f_k, \quad k = 1, \overline{\frac{t_e - t_s}{N}}, \quad (1)$$

где t_e – время окончания периода наблюдения, t_s – время начала периода наблюдения, N – число наблюдений, зафиксированных за период наблюдения.

Указанное определение числа k принимается в случае, если фиксация наблюдений происходит через равные промежутки времени.

Задача заключается в определении вспышек и нахождении подхода для дифференциации вспышек и выбросов.

Разработка алгоритма

1. Для каждой точки f_k , $k \neq 0, 1, (N-1), N$ рассматривается точка $f_{m_k} = f_{k-2}$. Вычисляется конечная разность первого порядка между этими точками (2).

$$\Delta f_k = f_k - f_{m_k}. \quad (2)$$

2. Затем определяется медианное значение полученных конечных разностей (3).

$$\exists g : F(\Delta f_g) = 0.5, \quad (3)$$

где $F(x)$ – функция распределения значений конечных разностей.

Авторы избрали подобную характеристику выборки за счёт того, что она обладает большей робастностью, то есть характеризуется большей устойчивостью к выбросам и помехам.

3. Выбранное медианное значение конечных разностей x далее участвует в алгоритме определения выбросов и вспышек. В частности, требуется построение множества s (4):

$$s = \left\{ s_k : s_k = \left| f_k - \Delta f_g \right| \right\}. \quad (4)$$

4. Выберем параметр $M \in \mathbb{R}$, превышающий в 5 раз 99-й процентиль набора s [2].

5. На основе исходных данных выполняем переопределение значений по следующему правилу (5):

$$s = \begin{cases} s_k, s_k > M, \\ 0, s_k \leq M. \end{cases} \quad (5)$$

6. Для каждой группы точек s_k выбираем достаточно малую окрестность ε , в которой находим наибольшее отклонение (6):

$$s_p = \max_{s_k \in \varepsilon} s_k \quad (6)$$

7. Под выбросом будем понимать точки f_p , которые удовлетворяют условию (7).

$$f_{p-2} < f_p < f_{p+2} \text{ или } f_{p+2} < f_p < f_{p-2} \quad (7)$$

8. Выбросы подлежат исключению из набора. Остальные точки будем считать подозрительными на вспышки.

9. Будем считать точки, подозрительные на вспышки, вспышками, если отклонение этой точки от следующей точки по модулю больше $0,75M$.

Пример

Рассмотрим работу алгоритма на примере экспериментального разряда 36612.

Вычислим конечные разности первого порядка. Найдём медианное значение и вычислим отклонения от медианного значения, представив графически. Код этого фрагмента приведён ниже.

```
# Загрузка и считывание файла с D-alfa
file <- "C: \\36612MP.txt"
Dalfa <- read.delim(file, header = FALSE, sep = "\t", dec =
".")
colnames(Dalfa) <- c('time', 'value')

# Строим график
ggplot() + geom_line(data = Dalfa, aes(x=time, y=value))

# Для каждой точки найдём предыдущую точку через одну и сле-
дующую точку через одну
Dalfa['next_value'] <- Dalfa[c(3:nrow(Dalfa), NA, NA), 'value']
Dalfa['prev_value'] <- Dalfa[c(NA, NA, 1:(nrow(Dalfa)-
2)), 'value']

# Найдём разность между текущей и предыдущей через одну точкой
Dalfa['diff'] <- abs(Dalfa$value - Dalfa$prev_value)

# Найдём медианное значение разностей
median_diff_Dalfa <- median(Dalfa[c(-1, -2), 'diff'])
```

```

# Найдём абсолютное отклонение разности от медианного значения
для каждой точки
Dalfa['diff_deviation'] <- abs(Dalfa['diff'] - me-
dian_diff_Dalfa)

# Строим график отклонений разностей
ggplot() + geom_line(data = Dalfa, aes(x=time,
y=diff_deviation))

```

График отклонений приведён на рисунке 1. Здесь на оси x отложено время в секундах, по оси y – напряжение в вольтах.

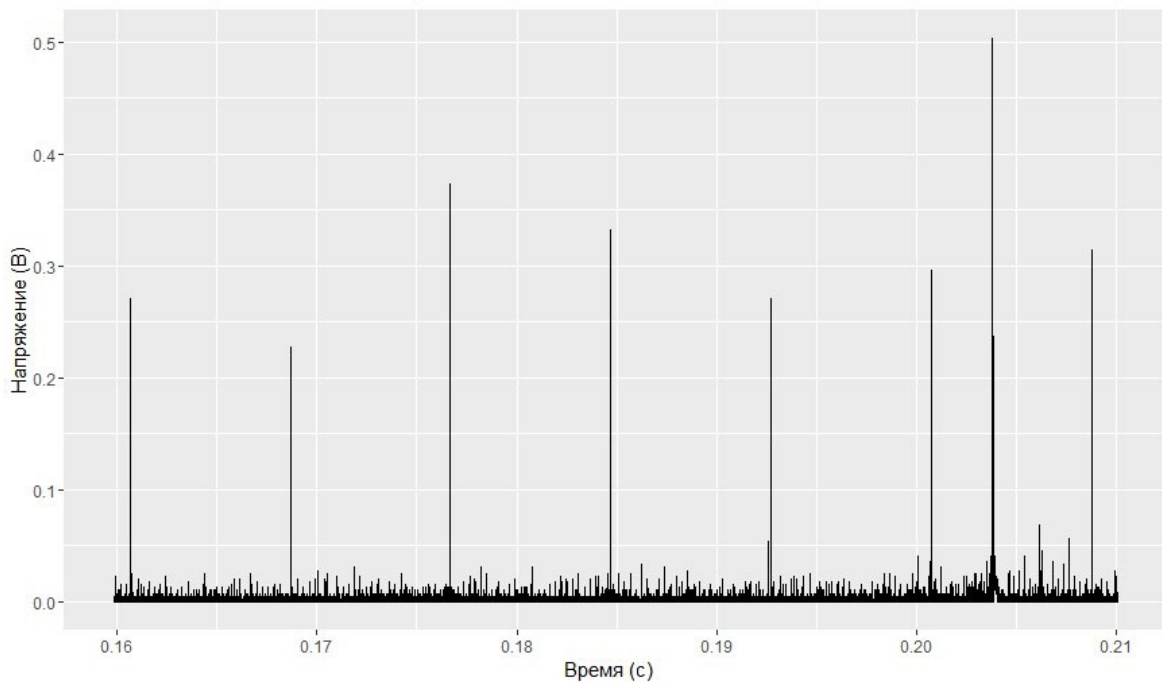


Рис. 1. График отклонений значений от медианного значения конечных разностей

Находим 99-й процентиль, выбираем параметр M , находим отклонения разностей, большие параметра M , определив таким образом точки выбросов, и затем совместим график сигнала $d\text{-}\alpha$ с найденными точками. Листинг программы приведён ниже.

```

# Найдём 99-й процентиль отклонений разностей
qnt <- quantile(Dalfa$diff_deviation, 0.99, na.rm=TRUE)

# Выберем параметр M как число, в 5 раз большее 99-го процен-
тиля
M = 5*qnt[1]

# Если отклонение разности меньше выбранного параметра - зану-
ляем
Dalfa['diff_deviation']<-ifelse(Dalfa$diff_deviation>M, Dal-
fa$diff_deviation, 0)

```

```
# Найденные выбросы поместим в новый фрейм
flash <- na.omit(Dalfa[Dalfa$diff_deviation>0, ])

# Строим график с точками-выбросами
ggplot() + geom_line(data = Dalfa, aes(x=time, y=value)) +
geom_point(data=flash, aes(x=time, y=value), color='red')
```

После чего получаем график на рисунке 2.

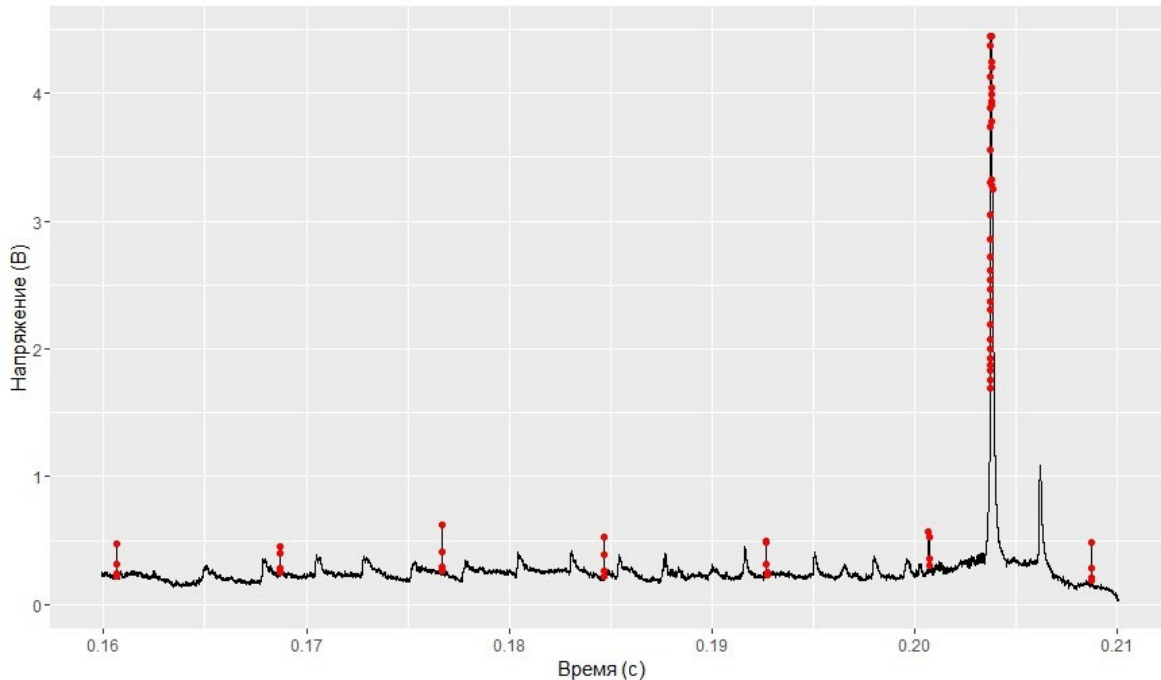


Рис. 2. Исходный график сигнала с обнаруженными точками выбросов и всплеск

На графике красными точками показаны найденные точки. У найденных точек f_k и точек $f_{m_k} = f_{k-2}$ разность значения напряжения больше параметра M . Очевидно, не все показанные точки являются всплесками или не являются точками максимального напряжения в момент всплески.

Чтобы отделить всплески от выбросов необходимо выполнить пункты 6–9 алгоритма. Листинг приведен ниже.

```
# Определяем окрестности точек
flash$group <- !duplicated(round(flash['time'], digits=3))
flash$group <- cumsum(flash$group)

# Находим точку с максимальным значением разности в каждой окрестности
flash <- flash %>% group_by(group) %>% slice(which.max(diff))

# Оставим только те точки, значения которых меньше\больше значений соседних точек
```

```

flash <- flash[(abs(flash$value) - flash$prev_value > 0) &
              (abs(flash$value) - flash$next_value > 0),]
# Оставим только те точки, у которых абсолютное отклонение
# разности между текущим значением и следующим значением >
# 0.75M
flash <- flash[abs(flash$value - flash$next_value) - me-
              dian_diff_Dalfa > 0.75*M,]

```

После применения алгоритма, связанного с дифференциацией выбросов от вспышек, получим график на рисунке 3. Здесь, как и ранее, на оси x отложено время в секундах, по оси y – напряжение в вольтах. На графике видно, что из всех найденных точек остались только те, что являются вспышками. Причём, найденные точки – максимальные значения вспышек, что позволяет определить максимальное и минимальное напряжение в моменты вспышек на протяжении всего сигнала d -alpha.

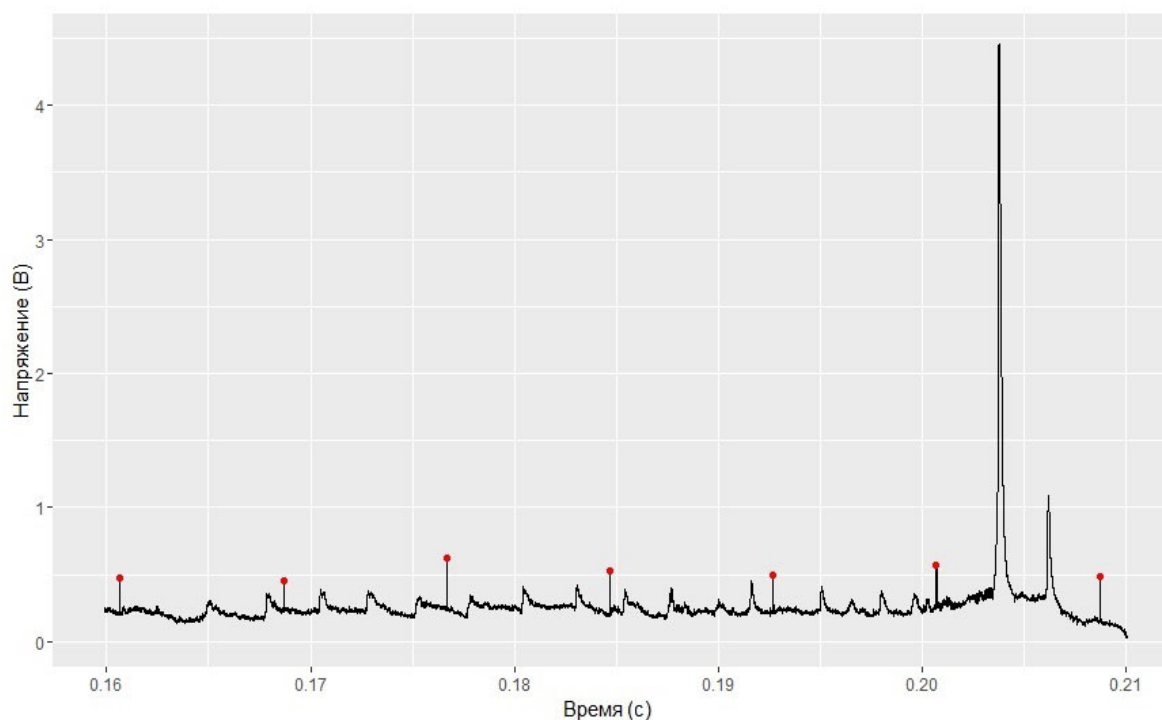


Рис. 3. Исходный график сигнала с обнаруженными вспышками

Заключение

В указанной работе была достигнута цель – разработан алгоритм обнаружения вспышек и дифференциации их от выбросов с помощью конечных разностей и анализа скорости изменения графика. Алгоритм приведён на языке статистической обработки данных R. Работоспособность алгоритма продемонстрирована на примере экспериментальных данных.

Благодарности

В работе использованы экспериментальные данные, полученные на уникальной научной установке «Сферический токамак Глобус-М», входящей в состав ФЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62119X0021). Коллектив авторов выражает благодарность научному сотруднику ФТИ им. А.Ф. Иоффе Курскиеву Г.С. за подробные консультации по анализу экспериментальных данных.

Список литературы

1. Шафранов В.Д., Бондаренко Б.Д., Гончаров Г.А., Лаврентьев О.А., Сахаров А.Д. К истории исследований по управляемому термоядерному синтезу // Успехи физических наук. 2001. № 8 (171). С. 877–886. URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2001/8/o/> (дата обращения: 23.04.2020). DOI: 10.3367/UFNr.0171.200108o.0877.
2. Брюс П., Брюс Э. Практическая статистика для специалистов Data Science: 50 важнейших понятий / Пер. с англ. СПб.: БХВ-Петербург, 2018. 303 с.
3. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник / Под ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова. М.: Высшая школа, 2004. 616 с.
4. Vega J., Murari A., Gonzalez S. A universal support vector machines based method for automatic event location in waveforms and video-movies: Applications to massive nuclear fusion databases // Review of scientific instruments. 2010. №81.

УДК 330.1

doi:10.18720/SPBPU/2/id20-253

*Нгуен Тхи Тху Зунг*¹,

студент ИКНТ;

*Черенькая Людмила Васильевна*²,

д-р техн. наук, профессор ИКНТ

МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ РАЙОНА ТХАЙ-БИНГ (ВЬЕТНАМ) НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ МНОГОМЕРНОЙ СТАТИСТИКИ

^{1,2} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия,

¹ thudung.mta.tb@gmail.com, ² ludmila@qmd.spbstu.ru

Аннотация. В социально-экономических системах широко используются методы многомерной статистики. Для определения факторов экономического развития был проведен сбор сведений о нескольких районах Вьетнама. На основе анализа методов многомерной статистики для решения поставленной задачи были выбраны два метода: метод факторного анализа и метод корреляционно-регрессионного анализа. Разработана модель, включающая методы расчета рейтинга и прогноза развития экономики нескольких районов Вьетнама. Модель реализована с