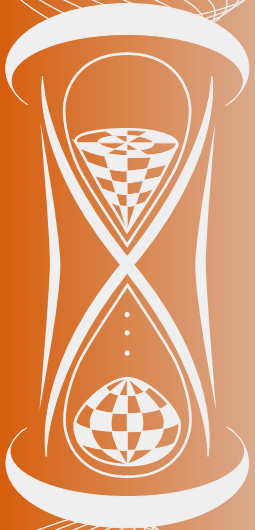


ISSN 2222-8772

**М**АТЕМАТИЧЕСКИЕ  
**С**ТРУКТУРЫ  
И  
**М**ОДЕЛИРОВАНИЕ

№ 4 (68)  
2023



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ  
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. Ф.М. ДОСТОЕВСКОГО»**

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ  
СТРУКТУРЫ  
И  
МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**№ 4 (68)**

Омск  
2023

**Редакционная коллегия**

- А. К. Гуц** **главный редактор**, председатель редакционной коллегии, доктор физ.-мат. наук, профессор, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, ведущий научный сотрудник ФИЦ «Субтропический научный центр РАН», г. Сочи.
- Д. Н. Лавров** **зам. глав. редактора**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информатики и методики преподавания информатики, Нижневартовский государственный университет, г. Нижневартовск.
- Н. Ф. Богаченко** **зам. глав. редактора**, технический редактор, канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой компьютерных технологий и сетей, Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского, г. Омск.
- В. П. Голубятников** доктор физ.-мат. наук, профессор Новосибирского государственного университета, главный научный сотрудник Института математики СО РАН им. С.Л. Соболева, г. Новосибирск.
- С. И. Горлов** доктор физ.-мат. наук, профессор, ректор Нижневартовского государственного университета, г. Нижневартовск.
- А. Г. Гринь** доктор физ.-мат. наук, профессор, кафедра информационной безопасности, Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского, г. Омск.
- В. А. Ерошенко** доктор физ.-мат. наук, профессор, кафедра общей математики и информатики, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь.
- V. Zilber** Dr.Sc. (Phys.-Math.), Professor of Mathematical Logic, Mathematical Institute, University of Oxford, UK.
- А. Н. Кабанов** канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры компьютерных технологий и сетей, Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского, г. Омск.
- А. В. Копыльцов** доктор техн. наук, профессор, кафедра информационных систем, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург.
- А. Г. Коробейников** доктор техн. наук, профессор, зам. директора по науке Санкт-Петербургского филиала Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, г. Санкт-Петербург.
- П. А. Корчагин** доктор техн. наук, профессор, проректор по научной работе, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ), г. Омск.
- V. Kreinovich** Ph.D. (Phys.-Math.), Professor, Computer Science Department, University of Texas at El Paso, Texas, USA.
- В. А. Плетюхов** доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры общей и теоретической физики Брестского государственного университета им. А. С. Пушкина, г. Брест, Республика Беларусь.
- Л. Б. Соколинский** доктор физ.-мат. наук, профессор, проректор по информатизации, зав. кафедрой системного программирования, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск.
- А. А. Fedorenko** Ph.D. (Phys.-Math.), Researcher (CR1) at the French National Centre of Scientific Research (CNRS) Laboratoire de Physique de l'ENS-Lyon, France.
- A. Jadczyk** Ph.D., Professor, Researcher, Laboratoire de Physique, Universite de Toulouse III et CNRS, France.

**Учредитель**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского»

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Реестровая запись ПИ № ФС77-72200 от 15 января 2018 г.

**Адрес редакции, издателя и типографии**

644077, Омская обл., г. Омск, пр-т Мира, д. 55а

**Дата выхода в свет:** 27.12.2023

**Тираж** 25 экз.

Свободная цена

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ  
СТРУКТУРЫ  
и  
МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Журнал основан в 1998 году. В журнале публикуются статьи, в которых излагаются результаты исследований по математике, теоретической физике, компьютерным наукам, философии и истории математики и информатики.

Все статьи журнала проходят обязательное рецензирование. Рефераты статей журнала опубликованы в «Реферативном журнале», «Mathematical Reviews» (США), «Zentralblatt für Mathematik» (Германия) и в РИНЦ (elibrary.ru). Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ, входящих в Международные реферативные базы данных (МРБД) и системы цитирования (Список от 30.12.2022, № 730), в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание учёных степеней (Приказ Минобрнауки России от 25.07.2014 № 793). Имеет категорию К1.

Все статьи в журнале публикуются под лицензией Attribution 4.0 International (CC-BY).

Электронная версия журнала представлена в сети:

<http://msm.omsk.su>  
<http://msm.univer.omsk.su>

Подписной индекс по каталогу «Пресса России»: 94082.

Электронная почта главного редактора:

[aguts@mail.ru](mailto:aguts@mail.ru)

Электронная почта выпускающего редактора:

[dmtrl@ya.ru](mailto:dmtrl@ya.ru)

# СОДЕРЖАНИЕ

## Фундаментальная математика и физика

А.Г. Гринь. *О моментах функций от случайных величин с  $p$ -перемешиванием* . . . . . 5

## Прикладная математика и моделирование

А.Ю. Горшенин. *Сравнение методов на основе деревьев решений в задаче краткосрочного прогнозирования электропотребления* . . . . . 12

А.К. Гуц. *Тектонические землетрясения и теория катастроф* . . . . . 22

А.К. Гуц. *Применение дифференциальных игр к описанию тектонических землетрясений* . . . . . 52

## Компьютерные науки

Д.И. Васина. *Обзор и апробирование методов машинного обучения для краткосрочного прогнозирования* . . . . . 59

И.А. Суров. *Процессная семантика комплексных чисел* . . . . . 71

Т.Е. Болдовская, В.И. Гресь, А.Е. Ветров. *Историческая иммортализация: эффективные методы долгосрочного хранения исторических данных* . . . . . 85

А.Т. Мухаматханова, Т.М. Опарина. *Модель распознавания пола диктора на основе аудиоданных* . . . 93

Т.В. Костеннов. *Об эффективности агрегации данных в сетях интернета вещей с использованием протокола MQTT* . . . . . 100

## Информационная безопасность

Д.Д. Лаврова, Д.Н. Лавров. *Модель архитектуры приложения, реализующего схему электронного тайного голосования He-Su* . . . . . 111

*Продолжение на следующей странице*

# Наши публикации



## Образование

С.В. Гусс. *От лабораторного стенда для изучения основ компьютерных сетей к хакерской для изобретателей и соревновательному киберполигону* ..... 120

Д.Э. Вильховский. *Формирование практических навыков студентов при изучении дисциплины «Анализ уязвимостей программного обеспечения»* . 130

## О МОМЕНТАХ ФУНКЦИЙ ОТ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН С $\rho$ -ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

А.Г. Гринь

доктор физ.-мат. наук, профессор, e-mail: griniran@gmail.com

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

**Аннотация.** Получены неулучшаемые по порядку оценки для моментов определённого класса функций от случайных величин, которые образуют стационарную последовательность с  $\rho$ -перемешиванием.

**Ключевые слова:** моменты случайных величин, симметрические функции от случайных величин,  $\rho$ -перемешивание.

В работе [1] М. Пелиград получила неулучшаемые по порядку оценки моментов сумм случайных величин из последовательности с  $\rho$ -перемешиванием. Для для последовательностей с более жёстким  $\varphi$ -перемешиванием такие оценки впервые получены И. А. Ибрагимовым (см., например: [2, лемма 18.5.1]); на этих оценках базировалось доказательство центральной предельной теоремы. В настоящей работе вместо сумм рассматриваются симметрические функции специального вида от величин из последовательности с  $\rho$ -перемешиванием и доказываются оценки для моментов этих функций. Для последовательностей с  $\varphi$ -перемешиванием такие оценки ранее были получены автором в [3].

Пусть при каждом  $n \in \mathbb{N}$  определена вещественнозначная функция  $f(\mathbf{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $x_1, \dots, x_n \in \mathbb{R}$  (т. е. определена последовательность функций, но, чтобы не загромождать рассуждения, мы не будем подчёркивать зависимость  $f$  от  $n$  какими-либо индексами и называть  $f$  последовательностью).

Будем предполагать, что функция  $f$  при любых  $x_1, \dots, x_n \in \mathbb{R}$ ,  $y_1, \dots, y_n \in \mathbb{R}$  удовлетворяет следующим условиям (условия А):

$A_1$ . Симметричность:  $f(x_{i_1}, \dots, x_{i_n}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  для любой перестановки  $\{i_1, \dots, i_n\}$  множества  $\{1, \dots, n\}$ ;

$A_2$ .  $f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, 0) = f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$ ;

$A_3$ .  $|f(\mathbf{x} + \mathbf{y})| \leq |f(\mathbf{x})| + |f(\mathbf{y})|$ .

Нетрудно видеть (см., например: [4]), что из условия  $A_3$  следует следующее утверждение:

$A'_3$ .  $||f(x_1, x_2, \dots, x_n)| - |f(x_1, x_2, \dots, x_k)|| \leq |f(x_{k+1}, \dots, x_n)|$  для любого  $1 \leq k \leq n$ . (Согласно сказанному выше  $f(x_1, x_2, \dots, x_k) = f(x_1, \dots, x_k, 0, \dots, 0)$ .)

Более того, из  $A_3$  вытекает  $|f(x_k)| \leq |f(x_1, x_2, \dots, x_k)| + |f(x_1, x_2, \dots, x_{k-1})|$ ,  $k = 2, \dots, n$ , так что

$$\max_{1 \leq k \leq n} |f(x_k)| \leq 2 \max_{1 \leq k \leq n} |f(x_1, x_2, \dots, x_k)| \leq 2(|f(x_1)| + \dots + |f(x_n)|). \quad (1)$$

В [4] приводятся многочисленные примеры функций, удовлетворяющих условиям А.

Пусть  $\{\xi_n\} = \{\xi_n, n = 1, 2, \dots\}$  – стационарная в узком смысле последовательность и пусть  $\mathcal{F}_{\leq n}$  и  $\mathcal{F}_{\geq n}$  –  $\sigma$ -алгебры, порождённые семействами  $\{\xi_i : i \leq n\}$  и  $\{\xi_i : i \geq n\}$ ,  $L_{\leq 0} = \{\xi : \xi \mathcal{F}_{\leq 0} \text{ – измерима, } \mathbf{E}\xi^2 < \infty\}$ ,  $L_{\geq n} = \{\eta : \eta \mathcal{F}_{\geq n} \text{ – измерима, } \mathbf{E}\eta^2 < \infty\}$ . Будем говорить, что стационарная последовательность  $\{\xi_n\}$  удовлетворяет условию  $\rho$ -перемешивания, если

$$\rho(n) = \sup \left\{ \frac{|\mathbf{E}\xi\eta - \mathbf{E}\xi\mathbf{E}\eta|}{\sqrt{\mathbf{E}\xi^2\mathbf{E}\eta^2}} : \xi \in L_{\leq 0}, \eta \in L_{\geq n} \right\} \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty,$$

(см., например: [2]). Взяв в этом определении

$$\xi = \mathbf{1}(A) = \begin{cases} 1, & \omega \in A \\ 0, & \omega \notin A \end{cases}, \quad A \in \mathcal{F}_{\leq 0}, \eta = \mathbf{1}(B), B \in \mathcal{F}_{\geq n},$$

получим

$$|\mathbf{P}\{AB\} - \mathbf{P}\{A\}\mathbf{P}\{B\}| \leq \rho(n)\sqrt{\mathbf{P}\{A\}\mathbf{P}\{B\}}. \quad (2)$$

Будем обозначать

$$X_{k,m} = f(\xi_k, \dots, \xi_m), \quad X_n = X_{1,n}, \quad \bar{X}_n = \max_{1 \leq k \leq n} |X_k|, \quad k, m, n \in \mathbb{N}.$$

Следующие две леммы – это обобщение соответствующих неравенств М. Пелиград из [1].

**Лемма 1.** Пусть  $\{\xi_n\}$  стационарная последовательность и пусть при некоторых натуральных  $n$  и  $r$  таких, что  $l = [n/r] \geq 2$  и  $a_n > 0$ , выполняется

$$\max_{1 \leq k \leq n} \mathbf{P}\{|X_k| > a_n\} + \sqrt{n/r}\rho(r) \leq \gamma < 1. \quad (3)$$

Тогда при любом  $x \geq a_n$

$$\mathbf{P}\{\bar{X}_n \geq 7x\} \leq \frac{1}{1-\gamma} \left( 2 \max_{2r \leq i \leq n} \mathbf{P}\{|X_i| > 3x\} + l\mathbf{P}\{\bar{X}_{2r} > x\} \right).$$

*Доказательство.* Пусть  $E_i(x) = \{\bar{X}_{i-1} \leq x, |X_i| > x\}$ ,  $i = 1, 2, \dots$ . Тогда  $E_i(x)E_j(x) = \emptyset$ ,  $i \neq j$ ,  $\bigcup_{i=1}^n E_i(x) = \{\bar{X}_n > x\}$ .

В силу  $A'_3$

$$|X_{(i+1)r,n}| \geq |X_{(i-1)r+j}| - |X_n| - |X_{(i-1)r+j+1, (i+1)r-1}|, \quad 1 \leq i \leq l-1, \quad 1 \leq j \leq r,$$

откуда с помощью (2) получаем

$$\mathbf{P}\{\bar{X}_n \geq 7x\} \leq \mathbf{P}\{|X_n| > 3x\} + \mathbf{P}\left\{ \bigcup_{i=1}^{n-1} (E_i(7x), |X_n| \leq 3x) \right\} \leq$$

$$\begin{aligned}
 &\leq \mathbf{P}\{|X_n| > 3x\} + \sum_{i=1}^{l-1} \mathbf{P}\left\{\bigcup_{j=1}^r (E_{(i-1)r+j}(7x), |X_{(i+1)r,n}| \geq 3x)\right\} + \\
 &\quad + \sum_{i=1}^{l-1} \mathbf{P}\left\{\bigcup_{j=1}^r (E_{(i-1)r+j}(7x), |X_{(i-1)r+j+1, (i+1)r-1}| \geq x)\right\} + \\
 &\quad + \sum_{i=(l-1)r+1}^n \mathbf{P}\{E_i(7x), |X_{i+1,n}| \geq 4x\} \leq \mathbf{P}\{|X_n| > 3x\} + \\
 &\quad + \sum_{i=1}^{l-1} \mathbf{P}\left\{\bigcup_{j=1}^r E_{(i-1)r+j}(7x)\right\} \mathbf{P}\{|X_{(i+1)r,n}| \geq 3x\} + \\
 &\quad + \rho(r) \sum_{i=1}^{l-1} \mathbf{P}^{1/2}\left\{\bigcup_{j=1}^r E_{(i-1)r+j}(7x)\right\} \mathbf{P}^{1/2}\{|X_{(i+1)r,n}| \geq 3x\} + \\
 &\quad + \sum_{i=1}^{l-1} \mathbf{P}\left\{\max_{1 \leq j \leq r} |X_{(i-1)r+j+1, (i+1)r-1}| \geq x\right\} + \mathbf{P}\left\{\max_{(l-1)r+1 \leq i \leq n} |X_{(i+1)r,n}| \geq x\right\}. \quad (4)
 \end{aligned}$$

Обозначим  $R_n(x) = \max_{2r \leq l \leq n} \mathbf{P}\{|X_{l,n}| > x\} = \max_{2r \leq l \leq n} \mathbf{P}\{|X_{n-l+1}| > x\}$ ,  
 $S_m(x) = \mathbf{P}\{\bar{X}_m > x\}$ . Нетрудно видеть, что

$$\begin{aligned}
 &\sum_{i=1}^{l-1} \mathbf{P}^{1/2}\left\{\bigcup_{j=1}^r E_{(i-1)r+j}(7x)\right\} \mathbf{P}^{1/2}\{|X_{(i+1)r+1,n}| \geq 3x\} \leq \\
 &\leq \sqrt{(l-1) \sum_{i=1}^{l-1} \mathbf{P}\left\{\bigcup_{j=1}^r E_{(i-1)r+j}(7x)\right\} \mathbf{P}\{|X_{(i+1)r+1,n}| \geq 3x\}} \leq \\
 &\leq \sqrt{(l-1)R_n(3x)S_n(7x)} \leq \sqrt{l-1} \left(S_n(7x) + \frac{1}{4}R_n(3x)\right) \quad (5)
 \end{aligned}$$

(в последнем переходе использовалось элементарное неравенство  $xy \leq x^2 + y^2/4$ ). Из (4) и (5) следует теперь

$$\begin{aligned}
 S_n(7x) &\leq R_n(3x) + R_n(3x)S_n(7x) + \rho(r)\sqrt{n/r} \left(S_n(7x) + \frac{1}{4}R_n(3x)\right) + \\
 &\quad + lS_{2r}(x) \leq \gamma S_n(7x) + 2R_n(3x) + lS_{2r}(x),
 \end{aligned}$$

откуда получаем утверждение леммы ■

**Лемма 2.** В условиях леммы 1

$$\mathbf{P}\{\bar{X}_n > 7x\} \leq \frac{2\gamma}{1-\gamma} \mathbf{P}\{\bar{X}_n > x\} + \frac{2}{1-\gamma} \mathbf{P}\{\bar{X}_{2r} > x\}$$



*Доказательство.* Пусть  $k = [m/r]$ ,  $E_i(x)$ ,  $S_n(x)$ ,  $R_n(x)$  определены так же, как в лемме 1. В силу  $A'_3$

$$|X_{(i+1)r,m}| \geq |X_m| - |X_{(i-1)r+j-1}| - |X_{(i-1)r+j,(i+1)r-1}|, \quad 1 \leq i \leq k-1, \quad 1 \leq j \leq r.$$

С помощью (2) получаем

$$\begin{aligned} \mathbf{P}\{|X_m| > 3x\} &= \mathbf{P}\{|X_m| > 3x, \bar{X}_m > x\} \leq \\ &\leq \sum_{i=1}^{k-1} \mathbf{P}\left\{\bigcup_{j=1}^r (E_{(i-1)r+j}(x), |X_{(i+1)r,m}| \geq x)\right\} + \\ &+ \sum_{i=1}^{k-1} \mathbf{P}\left\{\bigcup_{j=1}^r (E_{(i-1)r+j}(x), |X_{(i-1)r+j,(i+1)r-1}| \geq x)\right\} + \\ &+ \sum_{i=(k-1)r+1}^m \mathbf{P}\{E_i(x), |X_{i,m}| \geq 2x\} \leq \\ &\leq S_m(x)R_m(x) + \rho(r) \sum_{i=1}^{k-1} \mathbf{P}^{1/2}\left\{\bigcup_{j=1}^r E_{(i-1)r+j}(x)\right\} \mathbf{P}^{1/2}\{|X_{(i+1)r,m}| \geq x\} + \\ &+ \sum_{i=1}^{k-1} \mathbf{P}\left\{\max_{1 \leq j \leq r} |X_{(i-1)r+j,(i+1)r-1}| \geq x\right\} + \mathbf{P}\left\{\max_{(k-1)r+1 \leq i \leq m} |X_{i,m}| \geq x\right\} \leq \\ &\leq S_m(x)R_m(x) + \rho(r)\sqrt{(k-1)S_m(x)R_m(x)} + kS_{2r}(2x). \end{aligned}$$

Так как  $R_m(x) \leq S_m(x)$ , отсюда следует

$$R_n(3x) \leq \gamma S_n(x) + lS_{2r}(2x),$$

и с помощью леммы 1 получаем теперь

$$S_n(7x) \leq \frac{1}{1-\gamma} (2R_n(3x) + lS_{2r}(x)) \leq \frac{2\gamma}{1-\gamma} S_n(x) + \frac{2}{1-\gamma} S_{2r}(x).$$

■

**Теорема 1.** Пусть в условиях леммы 1

$$\mathbf{E}\bar{X}_n^p < \infty, \quad p > 1, \quad \delta = \frac{2\gamma 7^p}{1-\gamma} < 1, \quad \frac{n}{r} \left(\frac{a_r}{a_n}\right)^p \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty. \quad (6)$$

Тогда  $\sup_{n \geq 1} a_n^{-p} \mathbf{E}\bar{X}_n^p < \infty$ .

Доказательство. Имеем

$$\mathbf{E}\{|\xi|^p, |\xi| \geq a_n\} = - \int_{a_n}^{\infty} x^p d\mathbf{P}\{|\xi| \geq x\} = a_n^p \mathbf{P}\{|\xi| \geq a_n\} + p \int_{a_n}^{\infty} x^{p-1} \mathbf{P}\{|\xi| \geq x\} dx,$$

где  $a_n \geq 1$  удовлетворяет условию (3). С помощью леммы 2 получаем

$$\begin{aligned} \mathbf{E}\{\bar{X}_n^p, \bar{X}_n \geq 7a_n\} &\leq (7a_n)^p \mathbf{P}\{\bar{X}_n \geq 7a_n\} + p7^p \int_{a_n}^{\infty} x^{p-1} \mathbf{P}\{\bar{X}_n \geq 7x\} dx \leq \\ &\leq \frac{2\gamma 7^p}{1-\gamma} a_n^p \mathbf{P}\{\bar{X}_n \geq a_n\} + \frac{2l7^p}{1-\gamma} a_n^p \mathbf{P}\{\bar{X}_{2r} \geq a_n\} + \\ &+ \frac{2p\gamma 7^p}{1-\gamma} \int_{a_n}^{\infty} x^{p-1} \mathbf{P}\{\bar{X}_n \geq x\} dx + \frac{2lp7^p}{1-\gamma} \int_{a_n}^{\infty} x^{p-1} \mathbf{P}\{\bar{X}_{2r} \geq x\} dx = \\ &= \frac{2\gamma 7^p}{1-\gamma} \mathbf{E}\{\bar{X}_n^p, \bar{X}_n \geq a_n\} + \frac{2l7^p}{1-\gamma} \mathbf{E}\{\bar{X}_{2r}^p, \bar{X}_{2r} \geq a_n\}. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \mathbf{E}\bar{X}_n^p &\leq (7a_n)^p + \delta \mathbf{E}\bar{X}_n^p + \frac{2l7^p}{1-\gamma} \mathbf{E}\bar{X}_{2r}^p, \\ \mathbf{E}\bar{X}_n^p &\leq \frac{(7a_n)^p}{1-\delta} + \frac{2l7^p}{(1-\gamma)(1-\delta)} \mathbf{E}\bar{X}_{2r}^p. \end{aligned}$$

Обозначим

$$D_n = \mathbf{E} \left( \frac{\bar{X}_n}{a_n} \right)^p, \quad A = \frac{7^p}{1-\delta}, \quad C = \frac{2 \cdot 7^p}{(1-\gamma)(1-\delta)}.$$

Последнее неравенство принимает вид

$$D_n \leq A + C \frac{n}{r} \left( \frac{a_{2r}}{a_n} \right)^p D_{2r} \quad r = r(n) \rightarrow \infty, \quad 2r < n.$$

По условию при достаточно больших  $n$

$$C \frac{n}{2r} \left( \frac{a_{2r}}{a_n} \right)^p < \varepsilon < 1,$$

так что

$$D_n \leq A + \varepsilon D_{2r}. \tag{7}$$

Если  $\limsup_{n \rightarrow \infty} D_n = \infty$ , то найдётся подпоследовательность  $n_k \rightarrow \infty$  такая, что  $D_{n_k} = \max_{n \leq n_k} D_n \rightarrow \infty$ , и тогда, поскольку  $2r_k = 2r(n_k) < n_k$ , в силу (7)

$$D_{n_k} \leq A + \varepsilon D_{2r_k} \leq A + \varepsilon D_{n_k}, \text{ то есть } D_{n_k} \leq \frac{A}{1-\varepsilon}.$$

Полученное противоречие означает, что  $\limsup_{n \rightarrow \infty} D_n < \infty$ . Теорема доказана. ■

Некоторые комментарии по поводу условия (6).

Если, скажем,  $\{a_n\}$  – правильно меняющаяся последовательность порядка  $\rho$ ,  $\rho p > 1$  (см., например: [5]), то в (3)  $k = n/2r \rightarrow \infty$  можно сделать растущей столь медленно, что  $\frac{a_{km}}{a_m} \sim k^\rho$ ,  $m = 2r \rightarrow \infty$ , Тогда

$$\frac{n}{2r} \left( \frac{a_{2r}}{a_n} \right)^p = k \left( \frac{a_m}{a_{km}} \right)^p \sim k^{1-\rho p} \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty. \quad (8)$$

Пусть  $X_n = \sum_{i=1}^n \xi_i$ ,  $\mathbf{E}\xi_1 = 0$ ,  $\mathbf{E}\xi_1^2 < \infty$ ,  $\sigma_n^2 = \mathbf{D}X_n$ . Если  $\{\xi_n\}$  удовлетворяет условию  $\rho$ -перемешивания и  $\sigma_n \rightarrow \infty$ , то  $\{\sigma_n\}$  является правильно меняющейся последовательностью порядка  $1/2$  (см., например: [2, замечание 18.2.2]), которая при  $n \rightarrow \infty$  эквивалентна некоторой неубывающей последовательности [5, с. 26], так что  $\max_{1 \leq k \leq n} \sigma_k \sim \sigma_n$  и в (3) в качестве  $a_n$  можно взять  $N\sigma_n$ , где  $N > 0$  достаточно велико. В силу теоремы 1

$$\mathbf{E} \max_{1 \leq k \leq n} \left| \sum_{i=1}^k \xi_i \right|^p \leq K \sigma_n^p, \quad p > 2, \quad K > 0, \quad \text{причем так как } \mathbf{E} \left| \sum_{i=1}^k \xi_i \right|^p \geq \sigma_n^p,$$

то полученное неравенство неулучшаемо по порядку. Эта (и даже несколько более общая) оценка доказана в [1].

Аналогично, если в наших предположениях при некотором  $\alpha > 0$ ,  $B_n = (\mathbf{E}|X_n|^\alpha)^{1/\alpha}$  является правильно меняющейся последовательностью порядка  $\rho$  и  $\rho p > 1$ , то в силу теоремы 1  $\mathbf{E}\bar{X}_n^p \leq CB_n^p$  и так как  $p > 1$ ,  $\mathbf{E}\bar{X}_n^p \geq B_n^p$ , эта оценка неулучшаема по порядку.

Требование правильного изменения последовательности  $\{a_n\}$  избыточно, достаточно потребовать, например, чтобы  $a_{kn} \geq Ck^\rho a_n$ ,  $\rho p > 1$ ,  $C > 0$ . Если, например, функция  $f(x) > 0$ ,  $x > 0$  выпукла (вниз),  $f(n) = a_n$ , то  $a_{kn} = f(kn) \geq kf(n) = ka_n$  и условие (6) при  $p > 1$  выполняется очевидным образом. Такую выпуклую функцию можно подобрать всегда, взяв, например, вместо  $f(x)$  выпуклую оболочку  $f(x)$  (наименьшую выпуклую функцию, большую или равную  $f(x)$ ), но в этом случае полученная оценка для  $\mathbf{E}\bar{X}_n^p$  может и не быть неулучшаемой по порядку.

## Литература

1. Peligrad M. The convergence of moments in the central limit theorem for  $\rho$ -mixing sequences of random variables // Proceeding of the AMS. 1987. Vol. 101, No. 1. P. 142–148.
2. Ибрагимов И.А., Линник Ю.В. Независимые и стационарно связанные величины. М.: Наука, 1965. 524 с.
3. Гринь А.Г. О моментах симметрических функций от зависимых случайных величин // Математические структуры и моделирование. 2016. № 4 (40). С. 17–23.
4. Гринь А.Г. О предельных теоремах для функций от независимых случайных величин // Математические структуры и моделирование. 2016. № 2 (38). С. 5–15.
5. Сенета Е. Правильно меняющиеся функции. М.: Наука, 1985. 141 с.

**ON THE MOMENTS OF FUNCTIONS OF RANDOM VARIABLES WITH  $\rho$ -MIXING**

**A.G. Grin'**

Dr.Sc. (Phys.-Math.), Professor, e-mail: griniran@gmail.com

Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia

**Abstract.** Estimates for the moments for a certain class of functions of random variables from a stationary sequence with  $\rho$ -mixing is obtained in this article. This estimates that cannot be improved in order.

**Keywords:** moments of random variables, symmetric functions of random variables,  $\rho$ -mixing.

*Дата поступления в редакцию: 25.09.2023*

## СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ НА ОСНОВЕ ДЕРЕВЬЕВ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧЕ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

**А.Ю. Горшенин**

аспирант, e-mail: augomgtu@gmail.com

Омский государственный технический университет, Омск, Россия

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы краткосрочного прогнозирования электропотребления с использованием методом машинного обучения на основе деревьев решений. Проведен спектральный анализ, выявлены основные периоды в данных. Выполнено сравнение эффективности методов машинного обучения при помощи расчета основных метрик регрессионных моделей прогнозирования.

**Ключевые слова:** прогнозирование электропотребления, машинное обучение, деревья решений, спектральный анализ.

### Введение

Прогнозирование электропотребления становится важным аспектом в России. Наблюдается значительная динамика в использовании электроэнергии в стране, которая является одним из ведущих производителей [1–4] и потребителей [5] энергии в мире. В начале 2023 г. ОАО «Системный оператор Единой энергетической системы» (ОАО «СО ЕЭС») опубликовал отчет о производстве и использовании электроэнергии [6].

Согласно представленным данным, общее потребление электроэнергии в Единой энергетической системе России в 2022 г. увеличилось на 1,36 % по сравнению с 2021 г., достигнув отметки в 1,06 трлн кВт\*ч. Сведения от СО ЕЭС также указывают на то, что производство электроэнергии в первой ценовой зоне энергорынка (включая европейскую часть России и Урал, составляющие примерно 80 % всего производства страны) по итогам 2022 г. практически не изменилось, уменьшившись лишь на 0,2 %, достигнув отметки примерно 850 млрд кВт\*ч. Тепловые электростанции являлись основной причиной снижения производства.

Во второй ценовой зоне (Сибирь) производство электроэнергии, наоборот, стабильно увеличивалось. За 2022 г. показатель вырос более чем на 1 %, превысив отметку в 219 млрд кВт\*ч. В регионе Сибири наблюдалось снижение загрузки гидроэлектростанций (более чем на 10 % по сравнению с предыдущим годом) в связи с рекордно низким уровнем воды, но производство тепловых электростанций выросло почти на треть, по сравнению с предыдущим годом. Крупные компании увеличивали производство, отвечая на увеличивающийся спрос в регионе.

Необходимость более точного краткосрочного прогнозирования электропотребления в России возрастает [7, 8]. Такие прогнозы необходимы для обеспечения стабильной и эффективной национальной энергосистемы [9], оптимизации производства энергии и эффективного распределения ресурсов. Методы машинного обучения получили распространение в этой области благодаря их способности обрабатывать большие и сложные наборы данных [10, 11], что позволяет выявлять сложные модели потребления и прогнозировать будущий спрос.

Целью исследования является сравнение эффективности методов Catboost [12], XGBoost [13], LightGBM (LGBM) [14] и Random Forest [15] в прогнозировании электропотребления.

## 1. Спектральный анализ ретроспективных данных об электропотреблении

Ретроспективные данные об электропотреблении на энергосбытовых предприятиях поступают из внешних источников. Это связано с применением специфических информационных систем [16], используемых для автоматизации операций на таких предприятиях. При построении краткосрочного прогноза первичные данные необходимо первоначально извлечь из источников и выполнить их предварительную обработку.

Кроме того, при проведении исследований важно учитывать как явные, так и скрытые зависимости в структуре этих данных. Для поиска таких закономерностей и регулярных колебаний наиболее подходящими моделями являются те, которые основаны на быстром преобразовании Фурье.

Для проводимого исследования использовались данные об электропотреблении за период с 2015 по 2023 гг. Фрагмент таких данных представлен в таблице 1. Для более наглядного анализа полученных результатов быстрого преобразования Фурье целесообразно представить их в виде периодограммы. Это позволит визуально выявить наличие постоянных составляющих или низкочастотных компонентов, таких как тренды [17].

Таблица 1. Фрагмент протокола измерений данных

Дата, время	Электропотребление, мВт*ч	Температура воздуха, °С
01.12.2021, 0:00	504,3	-8,3
01.12.2021, 1:00	483,7	-7,1
01.12.2021, 2:00	469,2	-6,0
...	...	...
30.06.2023, 22:00	310,9	8,2
30.06.2023, 23:00	286,8	7,7

При анализе исходных данных с использованием метода спектрального анализа при обнаружении трендовых компонент целесообразно исключить их из набора

данных. Это важно, так как наличие трендов может внести значительные ошибки в высокочастотной области периодограммы. В таких ситуациях обычно используется формальная модель, которая аппроксимирует тренд с использованием линейной комбинации различных степенных полиномов. В эту модель включается свободный член, и параметры тренда оптимизируются с использованием метода наименьших квадратов [18]. Затем полученные значения тренда вычитаются из исходных данных. В самом простом случае это означает исключение постоянной составляющей из данных (центрирование ряда). Среднее значение ряда можно найти с помощью следующей формулы:

$$m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k, \quad (1)$$

где  $N$  – количество элементов в ряде;  $x_k$  –  $k$ -ый элемент ряда.

Центрированный ряд из сходного получается следующим образом:

$$x_k^0 = x_k - m, \quad k = 0, 1, \dots, N - 1. \quad (2)$$

Отсутствие постоянной компоненты в центрированном временном ряде подтверждается с помощью графического представления данных.

Для вычисления периодограммы используется быстрое преобразование Фурье. Для использования быстрого преобразования исходный временной ряд нужно дополнить нулями таким образом, чтобы длина нового ряда была  $N_1 = 2^p N$ . С помощью быстрого преобразования Фурье для отдельно взятого ряда было получено:

$$X_j = FFT_j \{x_k^0\}_{k=0}^{N_1-1} = \sum_{k=0}^{N_1-1} x_k^0 e^{-i \frac{2\pi}{N_1} k j}, \quad j = 0, 1, \dots, N_1 - 1, \quad (3)$$

где  $i$  – комплексное число.

Тогда периодограммы ряда могут быть вычислены по формуле:

$$D_j = \frac{1}{N^2} [(Re X_j)^2 + (Im X_j)^2], \quad j = 0, 1, \dots, \frac{N_1}{2}. \quad (4)$$

Отсчёты периодограммы соответствуют частотам:

$$\nu_j = \Delta \nu_j, \quad j = 0, 1, \dots, \frac{N_1}{2}, \quad (5)$$

где  $\Delta \nu_j = \frac{1}{N_1 \Delta t}$ ,  $\Delta t$  – временной шаг ряда.

Для оценивания дисперсии необходимо использовать формулу:

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} (x_k^0)^2. \quad (6)$$

Используя дисперсию временного ряда, в дальнейшем можно рассчитать пороговое значение для обнаружения сигнала. По представленному алгоритму были получены график электропотребления (рис. 1) и фрагмент периодограммы с ограничением оси  $X$  до 100 единиц (рис. 2).

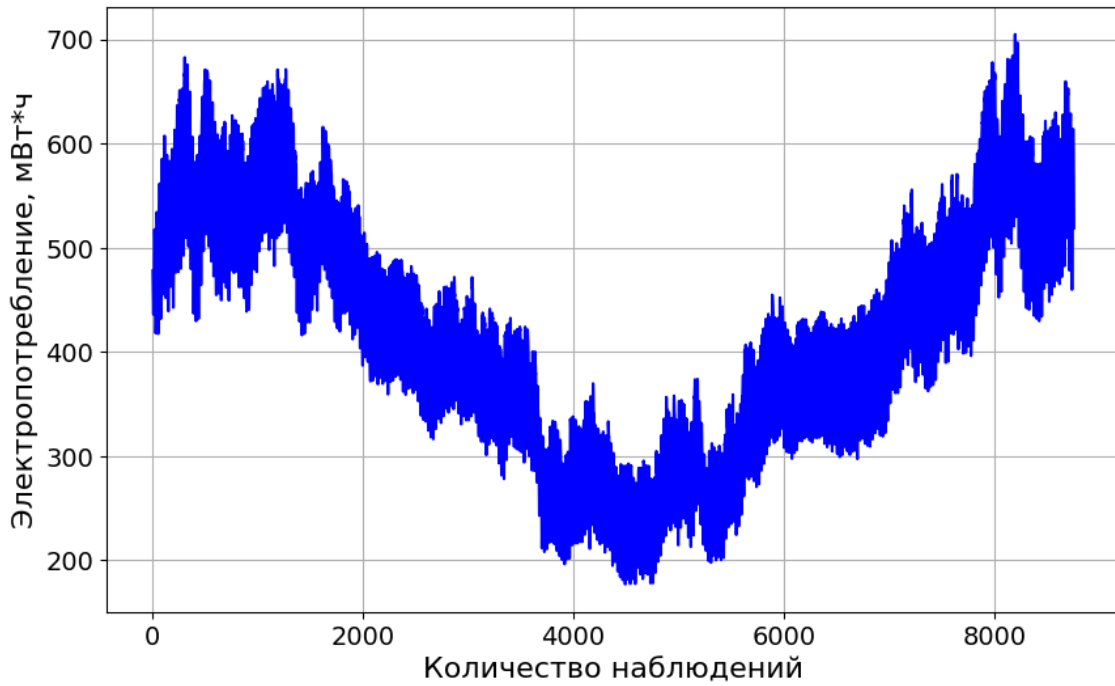


Рис. 1. График почасового электропотребления

Из графика установлена ярко выраженная цикличность процесса электропотребления.

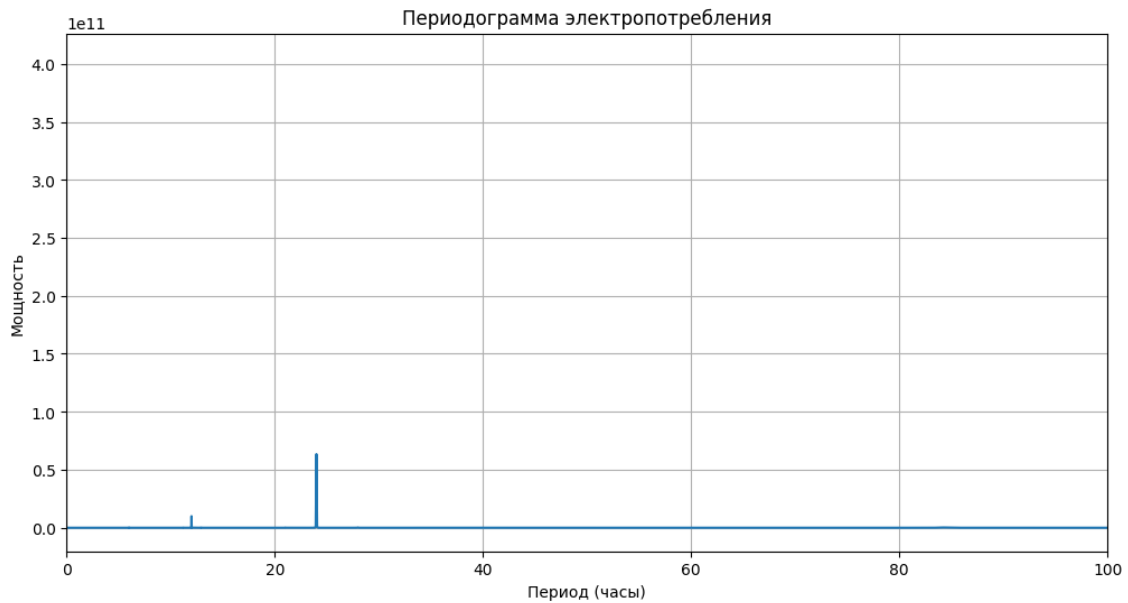


Рис. 2. Периодограмма почасового электропотребления

Далее была получена таблица всех пиков периодограммы, представленная в табл. 2.



Таблица 2. Пиковые значения периодограммы

№ п/п	Период, час	Периодограмма
1	8760,0000	4,058686e+11
2	4380,0000	6,535088e+08
3	2920,0000	1,305160e+09
4	2190,0000	8,039899e+09
...	...	...
4378	2,0009	1,174236e+03
4379	2,0004	3,017624e+05

В табл. 3 представлены наиболее мощные частотные характеристики. Проанализировав выделенные периоды (см. табл. 3.3), можно предположить, что сигналы под номерами 1 и 4 соответствуют году и трём месяцам соответственно, под номером 2 – суткам, сигнал под номером 3 соответствует половине месяца.

Таблица 3. Мощные частотные характеристики

№ п/п	Период, час	Периодограмма
1	8760,0000	4,058686e+11
2	24,0000	6,352815e+10
3	372,0000	9,964303e+09
4	2190,0000	8,039899e+09

Из приведённых выше данных видно, что были выявлены два важных цикла: суточный и годовой. Однако при более тщательном анализе мы можем обнаружить циклы продолжительностью, равной половине месяца и трём месяцам, и это указывает на наличие регулярных закономерностей в данных, которые следует учитывать при разработке краткосрочного прогноза для потребления электроэнергии.

## 2. Сравнение методов прогнозирования

Циклические данные демонстрируют регулярные повторяющиеся паттерны, или тенденции, во времени. Прогностическая пригодность циклических данных базируется на их повторяющихся образцах, которые могут быть идентифицированы и использованы для прогнозирования будущих событий. Для оценки эффективности прогнозирования электропотребления были использованы четыре основных метода машинного обучения: Catboost, XGBoost, LGBM и Random Forest. В исследовании использовались данные, подробно описанные в [7]. Графики рассеивания, представленные на рис. 3, отражают отношения между фактическими и прогнозируемыми значениями электропотребления при использовании каждого из методов.

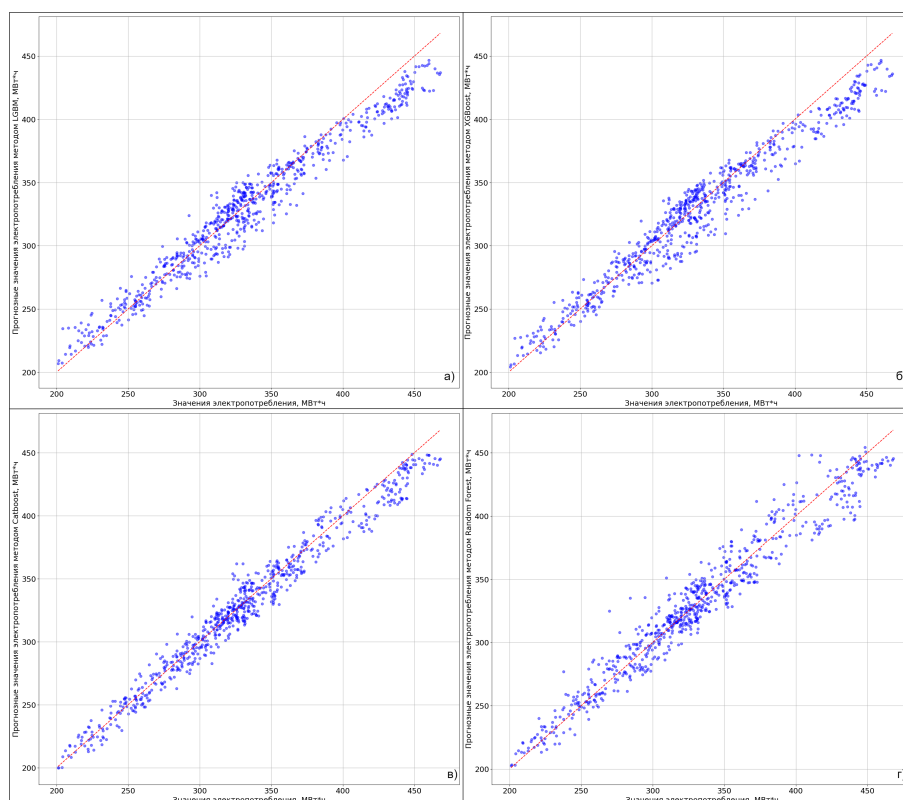


Рис. 3. Диаграмма рассеяния прогнозируемых и фактических значений моделей машинного обучения для прогнозирования активной мощности:  
(а) LGBM, (б) XGBoost, (в) Catboost, (г) Random Forest

Исходя из анализа графиков рассеивания, мы пришли к выводу, что метод Catboost демонстрирует наилучшую точность прогнозирования электропотребления по сравнению с XGBoost, LGBM и Random Forest. Его способность уменьшать разброс между фактическими и прогнозируемыми значениями электропотребления делает его наиболее надёжным инструментом для прогнозирования.

Рис. 4 иллюстрирует качество прогнозирования электропотребления за период с 01.06.2023 г. по 30.06.2023 г. На рисунке видно, что все методы имеют невысокий процент ошибки на месячном интервале, но лучше других себя показал метод Catboost (MAPE = 2,53 %).

На рис. 5 приведена гистограмма ошибок прогнозирования электропотребления для вариантов четырёх методов прогнозирования.

Рассматривался отрезок времени с 01.06.2023 г. по 30.06.2023 г., на котором видно, что наименьшие значения метрики MAPE имеет модель метода Catboost. Остальные методы показывают всплески ошибок в некоторые дни, что говорит о нестабильности этих методов и подтверждает обобщающую способность Catboost улавливать закономерности изменения целевой переменной.

Для оценивания качества работы и производительности представленных методов краткосрочного прогнозирования применялись метрики, характеризующие точность модели на фактических и прогнозных значениях [1].

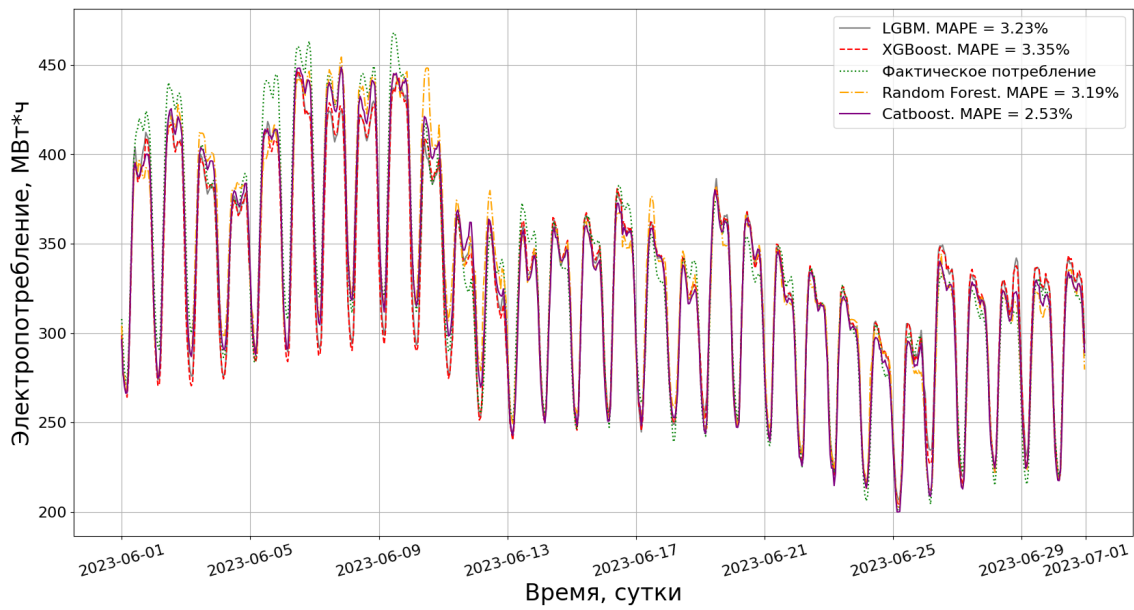


Рис. 4. Распределение электропотребления

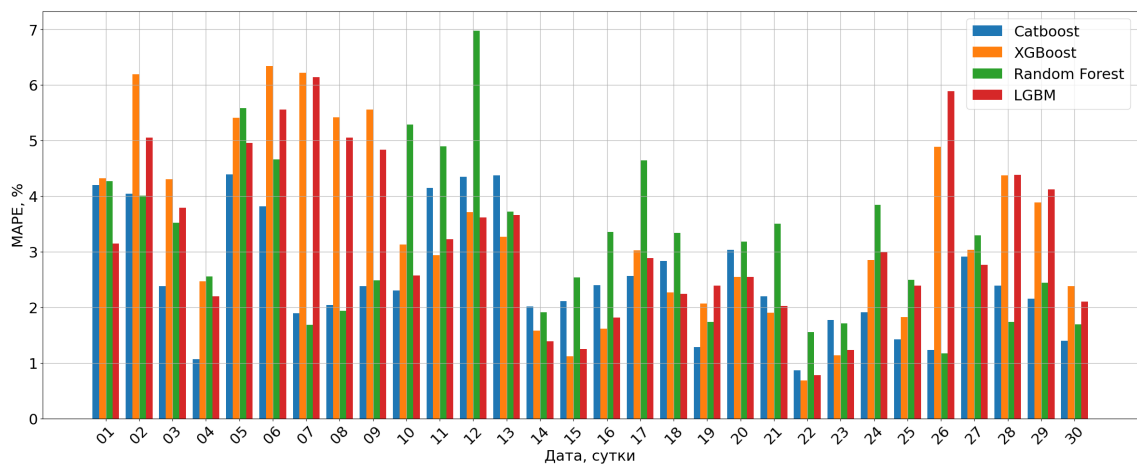


Рис. 5. Гистограмма ошибок (MAPE) прогнозирования электропотребления

Таблица 4. Метрики качества модели прогнозирования электропотребления

Метрики качества прогноза	Методы прогнозирования			
	<i>Catboost</i>	<i>XGBoost</i>	<i>LGBM</i>	<i>Random Forest</i>
<i>MAPE</i>	2,53%	3,35%	3,23%	3,19%
<i>RMSE</i>	10,79	14,63	13,75	13,63
<i>R2</i>	0,97	0,94	0,95	0,95

Значения метрик качества модели (в табл. 4) указывают на то, что модель метода Catboost является лучшей из представленных в исследовании. Так, метрика RMSE (корень из среднеквадратической ошибки), в которой используются те же единицы измерения, что и в исходных данных, указывает, что разница между фактическими и прогнозируемыми значениями невелика и составляет 10.79 МВт\*ч. Коэффициент детерминации  $R^2$  объясняет, насколько модель соответствует фактическим данным в задачах регрессии. Значение  $R^2 = 0,97$  (близко к 1), т. е. 97 % вариативности в данных объясняется моделью. Также для оценивания качества прогноза использовалась метрика MAPE, которая выражает среднюю абсолютную процентную разницу между фактическими и прогнозируемыми значениями. Метрика, характеризующая среднее отклонение модели от фактических значений,  $MAPE = 2,53$  % (хороший результат).

На основании полученных результатов сделан вывод о том, что для краткосрочного (на сутки вперед) прогнозирования электропотребления целесообразно использовать метод машинного обучения Catboost, так как он лучше выявляет существующие закономерности и зависимости в данных.

### 3. Результаты

Проведённые исследования позволили установить, что использование методов машинного обучения на основе градиентного бустинга деревьев решений для прогнозирования электропотребления на краткосрочный период является эффективным подходом.

Методы градиентного бустинга деревьев решений, использованные в исследовании, показывают хороший результат, уменьшают дисперсию прогнозов и обладают устойчивостью к переобучению, что доказывает их функциональность на больших обучающих выборках.

В дальнейшем планируется исследовать возможность синтеза представленных методов машинного обучения для возможности повышения точности прогнозирования.

### Литература

1. Горшенин А.Ю., Денисова Л.А. Прогнозирование выработки электроэнергии ветроэлектростанцией с применением рекуррентной нейронной сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 4. С. 39–45.
2. Горшенин А.Ю., Васина Д.И. Сравнение используемых методов при прогнозировании выработки электроэнергии ветроэлектростанциями // Математические структуры и моделирование. 2023. № 3 (67). С. 36–42. DOI: 10.24147/2222-8772.2023.3.36-42.
3. Васина Д.И. Актуальные проблемы применения солнечной электроэнергии и прогнозирования // Информационные технологии в науке и производстве : Материалы X Всероссийской молодёжной научно-технической конференции (Омск, 18 апреля 2023 г.) / редколлегия: А.Г. Янишевская (отв. ред.) [и др.]. Омск : Омский государственный технический университет, 2023. С. 89–91.
4. Васина Д.И. Описание программы для проведения анализа выработки мощности постоянного и переменного токов солнечной электростанции // Актуальные вопросы энергетики : материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным

- участием (Омск, 25–26 мая 2023 г.) / редколлегия: П.А. Батраков (отв. ред.) [и др.]. Омск: Омский государственный технический университет, 2023. С. 133–137.
5. Гаак В.К., Гаак А.В., Грицай А.С. Повышение экономической эффективности теплоисточников и систем теплоснабжения в современных условиях // Промышленная энергетика. 2017. № 12. С. 14–20.
  6. Отчёт за 2022 г. // СО ЕЭС: сайт. URL: [https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2023/ups\\_rep2022.pdf](https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2023/ups_rep2022.pdf) (дата обращения: 02.09.2023).
  7. Горшенин А.Ю. Формирование выборки исходных данных для машинного обучения модели краткосрочного прогнозирования электропотребления // Автоматизация в промышленности. 2023. № 10. С. 37–41. DOI: 10.25728/avtprom.2023.10.08.
  8. Горшенин А.Ю., Васина Д.И. Значение анализа данных в прогнозировании ветроэнергетики // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2023. № 1. С. 61–65. DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-61-65.
  9. Горшенин А.Ю. Анализ параметров ветроэлектростанций как объекта управления // Прикладная математика и фундаментальная информатика : материалы XII Международной молодежной научно-практической конференции с элементами научной школы (Омск, 16–21 мая 2022 г.) / отв. ред. А.В. Зыкина. Омск : Омский государственный технический университет, 2022. С. 80–81.
  10. Tyunkov D.A. [et al.] Short-term forecast methods of electricity generation by solar power plants and its classification // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1260, 5. P. 052033. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052033.
  11. Серебряков Н.А. Применение адаптивного ансамблевого нейросетевого метода для краткосрочного прогнозирования электропотребления электротехнического комплекса районных электрических сетей // Омский научный вестник. 2021. № 1 (175). С. 39–45.
  12. Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A., Dorogush A.V., Gulin A. CatBoost: unbiased boosting with categorical features // Advances in Neural Information Processing Systems, 2018. P. 6638–6648.
  13. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system. 2016. arXiv.org. DOI: 10.48550/arXiv.1603.02754.
  14. Ke G., Meng Q., Finley T., Wang T., Chen W., Ma W., Ye Q., Liu T.-Y. LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree // Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017). P. 3149–3157.
  15. Ho T.K. Random Decision Forests // Proceedings of the 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition, Montreal, QC, 14–16 August 1995. P. 278–282.
  16. Потапов В.И., Грицай А.С., Тюньков Д.А. Спектральный анализ ретроспективных данных ООО «Омская энергосбытовая компания» об электропотреблении // Омский научный вестник. 2016. № 5 (149). С. 74–76.
  17. Шугунов Л.Ж., Куповых Г.В. Разложение, анализ и прогноз временных рядов метеопараметров // Известия ЮФУ. Технические науки. 2005. № 11. С.15–21.
  18. Мусатов М.В., Львов А.А. Анализ моделей метода наименьших квадратов и методов получения оценок // Вестник СГТУ. 2009. № 2 (43). С. 137–140.

**COMPARISON OF METHODS BASED ON DECISION TREES IN THE PROBLEM OF  
SHORT-TERM FORECASTING OF POWER CONSUMPTION**

**A.Yu. Gorshenin**

Postgraduate Student, e-mail: augomgtu@gmail.com

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

**Abstract.** The paper examines the issues of short-term forecasting of power consumption using machine learning methods based on decision trees. A spectral analysis was carried out and the main periods in the data were identified. The effectiveness of machine learning methods was compared by calculating the main metrics of regression forecasting models.

**Keywords:** power consumption forecasting, machine learning, decision trees, spectral analysis.

*Дата поступления в редакцию: 14.11.2023*

## **ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ТЕОРИЯ КАТАСТРОФ**

**А.К. Гуц**

доктор физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, e-mail: aguts@mail.ru

Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр  
Российской академии наук», Сочи, Россия

**Аннотация.** Статья является обзорной и представляет исследования по применению математической теории катастроф к землетрясениям. Эти работы главным образом успешно ведутся в Китае и России. Отобраны статьи, в которых отражены такие катастрофы, как «складка», «сборка», «ласточкин хвост» и «бабочка».

**Ключевые слова:** землетрясения, теория катастроф, обзорная статья.

### **Введение**

Данная статья является обзором работ по применению математической теории катастроф [1, 2] к описанию землетрясений, которые представляют собой опасные природные явления, приводящие к бедствиям, разрушениям и человеческим жертвам во многих регионах самых различных стран.

В статье [3] авторы отмечают, что суть землетрясения заключается в том, что «возмущённая своей окружающей средой система горных пород-разломов переходит из неустойчивого состояния равновесия до землетрясения в устойчивое квазистатическое состояние равновесия после землетрясения. Теория катастроф заключается в том, как описать прерывистое изменение состояния системы, возникающее в результате непрерывного изменения системного управляющего параметра».

Затухание напряжения землетрясения и смещение афтершокового разлома являются типичными явлениями прерывистых изменений во время землетрясения [4]. Прерывистые изменения системы разломов в результате непрерывного изменения некоторого системного управляющего параметра – это область исследований математической теории катастроф.

Отметим, что хотя всплеск исследований на применение теории катастроф в различных областях науки приходится на 1970–80-е гг. с последующей потерей интереса к подобного рода изысканиям, этого нельзя сказать применительно к землетрясениям. В XXI в. постоянно появляются публикации, хотя и не часто, в которых пытаются не просто описать явления на языке теории катастроф, но и вывести соответствующую потенциальную функцию из тех или иных механических соображений и моделей.

## 1. Что такое землетрясение

Землетрясение – это подземные толчки и колебания земной поверхности. Причина землетрясения – высвобождение потенциальной упругой энергии вследствие внутреннего разрушения материала Земли [5, с. 13].

Землетрясения разделяются на:

*Обвальные (провальные) землетрясения* – обвалы пустот в земной коре.

*Вулканические землетрясения* – результат деятельности вулканов.

*Тектонические (разломные) землетрясения* – смещение, сдвиг тектонических плит в земной коре.

Обвальные землетрясения связаны с образованием под землёй пустот, возникающих под воздействием грунтовых вод, подземных рек или связанных с большими оползнями. При этом верхний слой поверхности земли обрушивается вниз, вызывая небольшие сотрясения.

Вулканические землетрясения – это землетрясения, при которых толчки возникают в результате высокого напряжения в недрах вулкана. Причина таких землетрясений – лава, вулканические газы. Землетрясения этого типа слабы, но продолжаются долго, многократно – недели и месяцы. Тем не менее опасности для людей землетрясение этого вида не представляет. Определения взяты из Википедии.

Нас интересуют тектонические землетрясения. Как они возникают?

Земная кора состоит из относительно целостных блоков. Блоки находятся в постоянном движении относительно друг друга. Границы между блоками – прослойки – представляют геоматериал, менее прочный, чем сами блоки. Движение блоков приводит к деформации как самих блоков, так и прослойки.

Землетрясение происходит, когда два блока внезапно скользят один по другому. Поверхность, по которой они скользят, называется *разломом* или *плоскостью разлома* [1]. Лишь немногие тектонические разломы выглядят в виде щелевидных полостей. В большинстве случаев эти полости заполнены или обвалившимися в них обломками окружающих пород, или минеральными зёрнами, выкристаллизовавшимися из просочившихся по разломам (разрывам) подземных вод, или закристаллизовавшимися магматическими расплавами. Поэтому часто разлом (разрыв) предстаёт перед нами в виде пластинообразного тела, которое отличается от окружающей среды (породы) меньшей или большей прочностью, а также другими физическими свойствами. На местности одни разломы проявляются в виде цепочек озёр, долин и иных понижений рельефа. Другие разломы (разрывы), наоборот, выглядят гребнями в рельефе. Немало разломов, даже крупных, которые практически никак не выражены в рельефе и обнаруживаются только при сопоставлении многочисленных обнажений горных пород или проходке горных выработок [2, с. 126].

Границы между блоками и сами блоки должны находиться под действием существенных касательных напряжений. Наличие высоких касательных напряжений, близких к пределу прочности материала блоков, – также существенная особенность земной коры [8].

При тектоническом землетрясении происходит разрядка упругих напряжений, возникающих при воздействии одного блока на другой. Границы блоков (плит) имеют множество разломов, и большинство землетрясений в мире происходит именно



по этим разломам. Поскольку края блока неровные, они цепляются за другие блоки, а остальная часть блока продолжает двигаться. Наконец, когда блок отодвинулся достаточно далеко, края на одном из разломов разрушаются и происходит землетрясение.

Пока края разломов сцеплены, а остальная часть блока движется, энергия, которая обычно заставляет блоки скользить мимо друг друга, накапливается. Когда сила движущихся блоков, наконец, преодолевает трение неровных краёв разлома и он отрывается, вся накопленная энергия высвобождается. Энергия распространяется от разлома во всех направлениях в виде сейсмических волн. Сейсмические волны сотрясают землю, проходя через неё, и когда волны достигают земной поверхности, они сотрясают землю и всё, что находится на ней.

За последние два века сильные землетрясения происходили как раз в результате образования крупных разломов, выходящих на поверхность Земли [10].

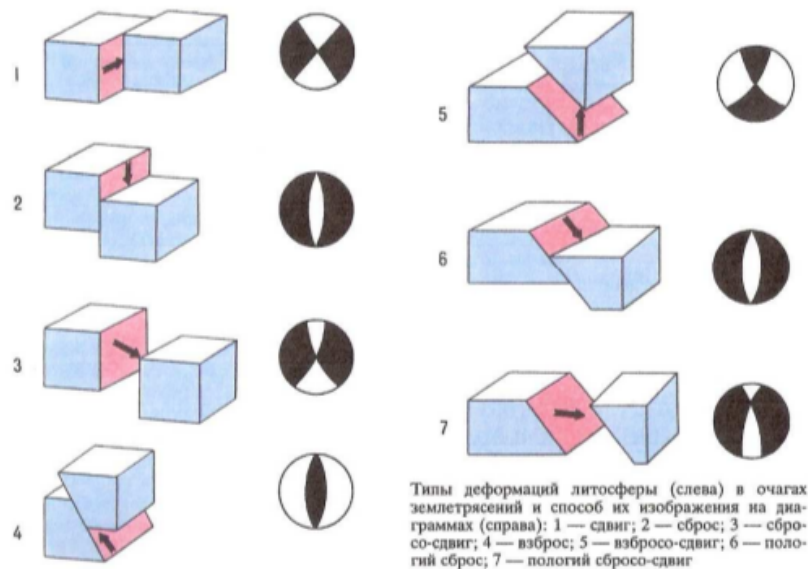


Рис. 1. Смещение блоков относительно друг друга [21]

Смещению пород вдоль разлома препятствует трение. Вследствие этого энергия, вызывающая движение, накапливается в форме упругих напряжений пород. Когда напряжение достигает некоторой критической точки, превышающей силу трения, происходит резкий разрыв пород с их взаимным смещением; накопленная энергия, освобождаясь, вызывает волновые колебания поверхности земли – землетрясения.

Сила землетрясения измеряется в магнитудах  $M$ .

«Иногда землетрясение сопровождается *форшоками*. Это меньшие землетрясения, которые происходят в том же месте, что и последующее более сильное землетрясение. Сейсмологи не могут сказать, что землетрясение является предвестником, пока не произойдёт более сильное землетрясение. Самое сильное и главное землетрясение называется *главным толчком*. За главными толчками всегда следуют *афтершоки*. Это небольшие землетрясения, которые происходят позже в том же

месте, где произошёл главный толчок. В зависимости от размера главного толчка афтершоки могут продолжаться в течение недель, месяцев и даже лет после главного толчка!» [1]

## 2. Теория катастроф

Математическая теория катастроф – это раздел теории особенностей дифференцируемых отображений и теории бифуркаций, который выделился в отдельную теорию благодаря теореме о семи катастрофах, доказанной французским математиком Рене Томом, а также благодаря статьям английского математика Кристофера Зеемана, много занимавшегося её приложениями в разных областях человеческих знаний. В какой-то мере такую теорию пытался в XIX в. создать российский математик Н.В. Бугаев, отец известного поэта Андрея Белого.

### 2.1. Катастрофы Рене Тома

Пусть состояние некоторой системы, а в нашем случае это система разломов, описывается величиной  $x \in \mathbb{R}^n$ , которая со временем изменяется по закону

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{\partial V(x, u)}{\partial x}, \quad u \in \mathbb{R}^k. \quad (1)$$

Семейство  $V(x, u)$  имеет особенность в точке  $x = 0$ , если  $V(0, u) = 0$ ,  $d_x V(0, u) = 0$ .

Множество  $C_V = \{(x, u) : d_x V(x, u) = 0\}$  называется множеством катастроф семейства  $V(x, u)$ , или множеством равновесий, поскольку оно состоит из стационарных равновесий.

Среди стационарных равновесий есть вырожденные – это особенности, образующие множество особенностей:

$$\Sigma_V = \{(x, u) \in C_V : \det d_x^2 V(x, u) = 0\},$$

проекция  $\pi_V : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^k$  которого на плоскость  $u \in \mathbb{R}^k$  даёт бифуркационное множество:

$$B_V = \pi_V(\Sigma_V) = \{u \in \mathbb{R}^k : \exists x((x, u) \in \Sigma_V)\}.$$

При изменении системного параметра  $u$  с пересечением множества  $B_V$  происходит скачкообразная (прерывистая) смена равновесия. Это и есть катастрофа!

Справедлива

**Теорема 1.** Для  $n \geq 1$  и  $k \leq 4$  существует открытое и плотное множество структурно устойчивых гладких  $k$ -параметрических семейств  $V(x, u) : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}$ , эквивалентных<sup>1</sup> вблизи любой точки одному из семи канонических семейств

$$CG(x) + F(x, u),$$

перечисленных в таблице 1.

Таблица 1. Катастрофы Тома при  $k \leq 4$ 

Тип	$n$	$k$	$CG(x)$	$F(x, u)$
Складка	1	1	$x^2$	$u_1x$
Сборка	1	2	$\pm x^4$	$u_1x + u_2x^2$
Ласточкин хвост	1	3	$x^5$	$u_1x + u_2x^2 + u_3x^3$
Бабочка	1	4	$\pm x^6$	$u_1x + u_2x^2 + u_3x^3 + u_4x^4$
Гиперболическая омбилическая точка	2	3	$x^3 + y^3$	$u_1x + u_2y + u_3xy$
Параболическая омбилическая точка	2	3	$\pm(x^2y + y^4)$	$u_1x + u_2y + u_3x^2 + u_4y^2$
Эллиптическая омбилическая точка	2	4	$x^3 - xy^2$	$u_1x + u_2y + u_3(x^2 + y^2)$

Мы видим, что формулировка этой теоремы раскрывает нам понятие *типичности* особенности, порождающей катастрофу: они образуют открытое плотное множество в многообразии всех гладких  $k$ -параметрических семейств функций. Иначе говоря, *почти любое* гладкое  $k$ -параметрическое семейство (с точностью до эквивалентности) указано в табл. 1.

## 2.2. Землетрясения с точки зрения теории катастроф

Суть землетрясения заключается в том, что нарушенная окружающей средой система горных пород-разломов переходит из неустойчивого состояния равновесия до землетрясения в устойчивое квазистатическое состояние равновесия после землетрясения [3].

Теория катастроф позволяет описать данное *прерывистое* изменение состояния системы, возникающее в результате непрерывного изменения системного параметра.

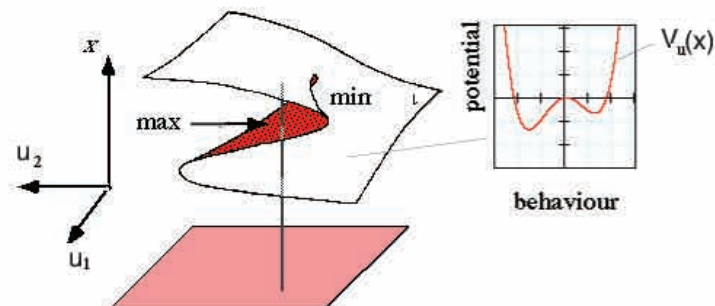


Рис. 2. Катастрофа «сборки»

<sup>1</sup>Под эквивалентностью понимается достижение совпадения функций за счёт преобразования координат  $x$  и параметров  $u$ .

*Устойчивые состояния* – это локальные минимумы потенциальной функции  $V(x, u)$ , где  $x$  – переменная состояния,  $u$  – управляющий параметр (рис. 2). При изменении  $u$  так, что бифуркационное множество не пересекается, минимумы плавно передвигаются, меняя место дислокации переменной  $x$ . При пересечении бифуркационного множества происходит скачкообразное исчезновение одного локального минимума в точке  $x_1$  и появление в ином месте  $x_2$  другого минимума (рис. 3). *Неустойчивые состояния* – это локальные максимумы функции  $V$ .

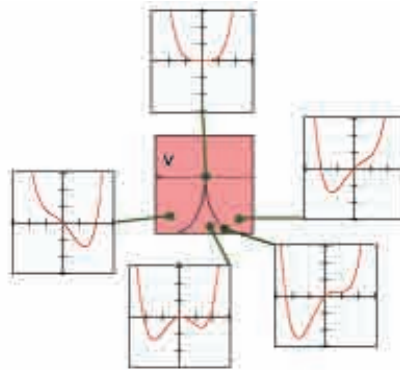


Рис. 3. Динамика появления и исчезновения максимумов и минимумов у функции  $V_{(u_1, u_2)}(x) = V(x, u_1, u_2)$

Основная задача, стоящая перед исследователем, пытающимся описать землетрясение с помощью теории катастроф, состоит в построении механической или аналитической модели системы разломов, благодаря которой удастся вывести вид потенциальной функции  $V(x, u)$ , определить ее тип, выявить смысл переменных  $x$  и  $u$ , особенно последнего, и, опираясь на математику, описать ход землетрясения. Вычислив бифуркационное множество, можно понять, насколько далеки от него значения «управляющего землетрясением» параметра  $u$ , и, отслеживая его, надеяться предсказать землетрясение.

### 3. Катастрофа «сборка»: предсказание времени и магнитуды землетрясения

Катастрофа «сборка» является самой популярной катастрофой, которую используют в самых разнообразных исследованиях, касающихся описаний как природных, так и социальных явлений [1].

Поэтому не удивительно, что это же произошло при моделировании землетрясений. К сожалению, первые обнаруженные нами статьи на данную тему [13–15] были написаны в 1984, 1988 и в 1994 гг. на китайском языке и поэтому не попали в этот обзор.

Ниже мы подробно излагаем статью, опубликованную в 1989 г. китайскими же исследователями [11], предложившими алгоритм вычисления даты и магнитуды землетрясения, основанный на теории катастрофы «сборка».

Как известно, сейсмический разлом площадью  $S$  и сейсмическая энергия связаны уравнением [16]:

$$E = \frac{c}{2\mu}(\Delta\sigma)^2 S^{3/2}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – модуль сдвига,  $\Delta\sigma$  – падение напряжений,  $c$  – безразмерная характеристика очага, составляющая от 0,2 до 0,4 [9].

Таким образом:

$$E \propto S^{3/2} \quad (3)$$

или

$$S \propto E^{2/3}. \quad (4)$$

Когда  $\Delta\sigma$  почти постоянно, имеем для суммарной площади сейсмических разломов:

$$\sum S \propto \sum E^{2/3}. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) показывают, что площадь сейсмического разлома (или общая площадь сейсмических разломов) пропорциональна  $2/3$ -й степени сейсмической энергии (или сумме  $2/3$ -х степеней сейсмических энергий).

По формулам (4) и (5) временные ряды сейсмичности в изучаемом регионе могут быть преобразованы во временные ряды общей площади разломов. Суммарный площадно-временной ряд разломов по реальным данным в регионе, безусловно, отражает процесс развития разломов, т. е. сейсмогенез и землетрясения, происходящие в регионе, что может коррелировать с процессами, описываемыми моделью *IPE* В.И. Мячкина и О.Д. Воеводы [17].

С точки зрения теории катастроф наша цель – проанализировать потенциальную функцию, т. е.  $\sum E^{2/3}$  как функцию времени  $t$ , и прояснить катастрофическое состояние развивающихся разломов.

Полагаем, что

$$\sum E^{2/3} = f(t). \quad (6)$$

Авторы делают важное предположение, что  $f(t)$  и её разложение Тейлора изоморфны, т. е. одно переводится в другое с помощью диффеоморфизма. Иначе говоря, предполагается, что 4-определённой [1].

Тогда

$$\sum E^{2/3} = j^4 f = a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0, \quad (7)$$

где  $j^4 f$  – 4-струя функции  $f$ .

Фактически авторы допускают, что рассматриваемая функция  $f(t)$  является *типичной*. В принципе, это означает предположение о типичности рассматриваемого землетрясения. Можно, однако, задаться вопросом: почему берётся катастрофа «сборка», а не, скажем, «бабочка»? Единственный ответ, который напрашивается, – «сборка» проще, поэтому её и берём.

Член третьего порядка в уравнении (7) можно устранить преобразованием:

$$t \rightarrow z - q, \quad (8)$$

$$q = \frac{a_3}{4a_4}.$$

Таким образом, мы получаем:

$$\sum E^{2/3} = b_4 z^4 + b_2 z^2 + b_1 z + b_0, \quad (9)$$

где

$$\begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q^4 & -q^3 & q^2 & -q & 1 \\ -4q^3 & 3q^2 & -2q & 1 & 0 \\ 6q^2 & -3q & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_4 \\ a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Уравнение (9), очевидно, представляет собой катастрофу «сборки».

Обозначим:

$$\varepsilon = \frac{1}{4b_4} \sum E^{2/3}, \quad A = \frac{b_2}{2b_4}, \quad B = \frac{b_1}{4b_4}, \quad C = \frac{b_0}{4b_4} \quad (11)$$

и тогда уравнение (9) будет выглядеть следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{1}{4} z^4 + \frac{1}{2} A z^2 + B z + C. \quad (12)$$

Следует отметить, что по сравнению со стандартным выражением для катастрофы «сборка», данным Постоном и Стюартом [1], в уравнении имеется дополнительный постоянный член  $C$ . Это сдвиговый член. Он не имеет значения для оценки опасности землетрясений, но для прогноза землетрясений незаменим.

Многообразие катастроф функции  $\varepsilon$  есть

$$C_\varepsilon = \{z : z^3 + Az + B = 0\}, \quad (13)$$

а бифуркационное множество:

$$B_\varepsilon = \{(A, B) : 4A^3 + 27B^2 = 0\}.$$

Обозначая

$$D = 4A^3 + 27B^2, \quad (14)$$

из теории катастроф мы узнаем, что когда  $D < 0$ , то параметры управления  $A$  и  $B$  находятся внутри бифуркационного множества, а  $\varepsilon$  находится в неустойчивом равновесии. Аналогично, когда  $D > 0$ , то  $A$  и  $B$  находятся вне бифуркационного множества, а  $\varepsilon$  находится в устойчивом равновесии. Наконец, при  $D = 0$  параметры управления попадают точно на границу бифуркационного множества и  $\varepsilon$  находится в критическом состоянии между устойчивым и неустойчивым равновесием.

Детальный анализ показывает, что для  $b_4 > 0$  величины  $\sum E^{2/3}$  и  $\varepsilon$  находятся в одном и том же состоянии, а при  $b_4 < 0$  – в противоположных состояниях.

Обратим внимание на то, что смысл управляющих параметров  $A$  и  $B$  авторами не проясняется, и это отчасти объясняется тем, что основная формула (7) не выводится, а постулируется.

### 3.1. Риск землетрясения

С учётом всех вышеперечисленных случаев, когда  $b_4$  и  $D$  имеют противоположный знак, кривая  $\sum E^{2/3}(t)$  может быть оценена как связанная с определённым риском землетрясения, а когда  $b_4$  и  $D$  имеют один и тот же знак, риск землетрясения не распознаётся.

Дальнейший детальный анализ показывает (см. § 3.2), что только  $T_{max}$  соответствует  $z_0$ , что удовлетворяет условию:

$$\frac{\partial^3}{\partial z^2} \sum E^{2/3} < 0, \quad (15)$$

то есть:

$$\begin{aligned} z_0 - z^* < 0 \text{ при } b_4 > 0, \\ z_0 - z^* > 0 \text{ для } b_4 < 0. \end{aligned} \quad (16)$$

В опасный период сильного землетрясения соответствующая критическая точка  $z_0$  взята из  $C_\varepsilon$ , а  $z^*$  равно:

$$z^* = \sqrt{-\frac{A}{3}}. \quad (17)$$

Следовательно, с помощью уравнений (16) и (17) мы можем оценить, приближается ли риск землетрясения или уже прошёл. Без всякого сомнения, по формулам (16) и (17) можно сделать вывод об отсутствии сейсмического риска в случае  $A > 0$ .

Вопрос, возникающий после анализа опасностей, если риск был выявлен, – насколько серьёзной является опасность землетрясения, вероятно, будет и где и когда будет опасность?

Касательно местоположения центра потенциального землетрясения его можно с уверенностью считать расположенным в регионе, где имеются данные о сейсмичности, отражающие микротрещинистость. Однако такая область обычно больше, чем хотелось бы, поэтому следует опираться на дополнительную информацию.

### 3.2. Магнитуда и время землетрясения

Авторы, как видно из названия параграфа, своё внимание сконцентрировали на предсказании магнитуды и времени землетрясения. В общем случае ордината критической точки кривой  $f(t)$ , соответствующая решению уравнения (13) (многообразие катастроф для  $\varepsilon$ ), является мерой максимальной величины магнитуды.

Максимальную магнитуду  $M_{max}$  можно получить из  $\sum E^{2/3}$ , используя формулу Гутенберга – Рихтера:

$$\log E = 11,8 + 1,5M_s, \quad (18)$$

где  $M_s$  – магнитуда поверхностной волны. По абсцисса критической точки – это время  $T_{max}$  возникновения землетрясения. Из-за несовершенства несколько произвольного выбора временного и пространственного масштабов используемых данных точность  $M_{max}$  и  $T_{max}$ , рассчитанных указанным выше способом, сомнительна.

Чтобы улучшить наш прогноз, мы модифицируем результат следующим образом:

$$\widehat{M}_{max} = K_m M_{max}, \tag{19}$$

$$\widehat{T}_{max} = K_t T_{max}, \tag{20}$$

где  $\widehat{M}_{max}$  и  $\widehat{T}_{max}$  – планируемый прогноз максимальной магнитуды и соответствующего времени возникновения землетрясения соответственно;  $M_{max}$  и  $T_{max}$  опираются на уравнения (7), (8), (13) и (18), а  $K_m$  и  $K_t$  – безразмерные константы, обе являющиеся квадратичными функциями от  $M_{max}$  и  $T_{max}$ , представленные как:

$$K_m = \alpha M_{max}^2 + \beta T_{max}^2 + \gamma M_{max} + \tau T_{max} + \omega, \tag{21}$$

$$K_t = \lambda M_{max}^2 + \mu T_{max}^2 + \xi M_{max} + \eta T_{max} + \zeta, \tag{22}$$

где  $\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \mu, \xi, \eta, \zeta$  – неопределенные множители. Они определяются на основе большого количества данных по предыдущим землетрясениям с использованием метода наименьших квадратов.

Для того чтобы дать предсказание по величинам  $\widehat{M}_{max}$  и  $\widehat{T}_{max}$ , нужно вычислить неопределённые коэффициенты.

Это делается на основе данных ряда исторических последовательностей землетрясений. В результате проделанной работы авторы получили значения этих коэффициентов для Китая (см. табл. 2).

Значения коэффициентов в этой таблице могут корректироваться по мере накопления реальных данных. Единицы  $M_{max}$  и  $T_{max}$  в уравнениях (21) и (22) такие же, как и в уравнениях (19) и (20) (в нашем случае  $год$  и  $M_s$  соответственно).

Таблица 2. Множители уравнений (21), (22) для Китая [11]

	Whole of China	Eastern China	Sichuang-Yunnan area
$\alpha$	$+4.2029 \times 10^{-2}$	$-1.9779 \times 10^{-1}$	$+3.4834 \times 10^{-2}$
$\beta$	$-7.1445 \times 10^{-4}$	$-1.2125 \times 10^{-3}$	$+1.1675 \times 10^{-3}$
$\gamma$	$-5.7520 \times 10^{-1}$	$+2.3556$	$-5.0214 \times 10^{-1}$
$\tau$	$+1.6227 \times 10^{-3}$	$+2.2290 \times 10^{-3}$	$-1.9062 \times 10^{-2}$
$\omega$	$+3.0918$	$-5.6938$	$+2.9410$
$\lambda$	$+7.5398 \times 10^{-2}$	$+2.4524 \times 10^{-1}$	$+8.9945 \times 10^{-2}$
$\mu$	$+2.3991 \times 10^{-3}$	$+6.3701 \times 10^{-3}$	$+3.2341 \times 10^{-3}$
$\xi$	$-7.3152 \times 10^{-1}$	$-2.2975$	$-1.2416$
$\eta$	$-1.1509 \times 10^{-1}$	$-2.0220 \times 10^{-1}$	$-9.4261 \times 10^{-2}$
$\zeta$	$+3.8836$	$+7.6945$	$+6.0797$

### 3.3. Алгоритм предсказания землетрясения

Изложим алгоритм предсказания землетрясения.

(1) На основе геологических и тектонофизических данных выбираем регион с относительно однородными геологическими условиями и сейсмичностью. Протяжённость региона может быть определена в соответствии с данными сейсморазведки и геологической структуры. Должна быть доступна серия записанных данных по землетрясениям.



(2) Фиксируется время начала зарегистрированной умеренной микросейсмичности; выбор обычно делается между первым землетрясением в последовательности или прекращением последнего землетрясения в последовательности. Если это трудно определить для новой последовательности землетрясений, в качестве времени начала можно принять начальную точку нелинейного сегмента его кривой  $\sum E^{2/3}(t)$ . Период, который охватывают данные по землетрясениям, должен составлять от нескольких месяцев до нескольких лет или даже десятилетий, а число зарегистрированных землетрясений должно быть больше шести, но чем больше, тем лучше. Однако данные о микросейсмичности не всегда улучшают прогноз. Наш предварительный опыт показывает, что данные для  $M \geq 2,5$  требуются для прогнозирования событий с  $M > 5$ . Для оценки вероятности событий с  $M > 6$  нижний предел все еще может быть выше, чем  $M = 2,5$ , если данных достаточно.

(3) Выбранные данные переводим в энергию  $E$ , используя формулу (18).

(4) Используем принцип:

$$\sum_i \left( \sum E^{2/3} - \sum E_i^{2/3} \right) = \min, \quad (23)$$

где  $i$  – номер использованного в расчётах зарегистрированного землетрясения, для того, чтобы определить коэффициенты  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$  в (7).

(5) Вычисляем  $q, b_0, b_1, b_2, b_4, A, B, C, D$ , используя уравнения (8), (10), (11), (14).

(6) По знакам  $b_4$  и  $D$  оцениваем опасность землетрясения. Если  $b_4$  и  $D$  имеют один и тот же знак, опасность землетрясения не будет распознана, и процедура будет остановлена.

Если  $b_4$  и  $D$  имеют разные знаки, то определяется риск землетрясения и для составления прогноза потребуются дальнейшие расчёты и анализ.

(7) Используя формулы Кардана решения алгебраического уравнения 3-й степени, устанавливается действительное решение кубического уравнения (13). Если решение не удовлетворяет условиям (16) и (17) или  $A > 0$ , что снова указывает на отсутствие риска землетрясения, анализ на этом прекращается.

Напротив, если решение удовлетворяет условиям (16) и (17), соответствующее значение  $t$  в уравнении (7) будет указывать на время риска надвигающегося землетрясения; его обозначаем как  $T_{max}$ .

(8) Подставляем  $t = T_{max}$  в уравнение (7) и вычисляем  $\sum E_{max}^{2/3}$ , а затем переходим к вычислению соответствующего  $M_{max}$  с помощью уравнения (18).

(9) Вычисляем константы  $K_m$  и  $K_t$ , следуя уравнениям (21) и (22).

(10) Величины  $\hat{M}_{max}$  и  $\hat{T}_{max}$  вычисляются с использованием уравнений (19) и (20). Следует напомнить, что  $\hat{M}_{max}$  и  $\hat{T}_{max}$  являются прогнозами магнитуды и времени возникновения наиболее опасного землетрясения в последовательности землетрясений в соответствующем регионе.

#### 4. Катастрофа «бабочка»: сейсмические процессы

В предыдущем параграфе фактически постулируется формула (7), предполагающая, что сейсмическая энергия как функция времени является 4-определённой

функцией, т. е. представляется катастрофой «сборка». Очевидно, хотелось бы построить математическую модель землетрясения, в которой одна из особенностей, одна из семи катастроф Тома, не постулируется, а выводится.

Такое делается в статьях С.А. Арсеньева [18–20].

Рассматривается сейсмически активный разлом, один из берегов которого движется относительно другого со скоростью  $v_0$  (рис. 1) и строится механическая модель землетрясения из пружин и блоков (рис. 4).

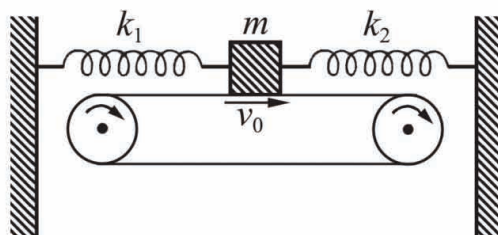


Рис. 4. Механическая модель колеблющегося блока массы  $m$  внутри очага землетрясения. Значения  $k_1$  и  $k_2$  являются коэффициентами упругого взаимодействия [18]

Блок с массой  $m$  лежит на движущемся со скоростью  $v_0$  основании. Упругое взаимодействие с соседними блоками в разломе показано в виде пружин с жёсткостью  $k_1$  и  $k_2$ . Обозначая результирующий коэффициент упругости буквой  $k$  и *смещение* блока буквой  $x$ , уравнение движения блока записываем в виде

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + kx = F, \tag{24}$$

где точки над  $t$  обозначают производные по времени  $t$ ,  $F$  – сила трения:

$$F = \mu G, \quad G \text{ – вес блок, } \mu = \frac{p - b}{1 + s - \beta x'_t} \text{ – коэффициент трения.} \tag{25}$$

Уравнение (24) приводится к уравнению для преобразованного *смещения* блока  $z$ :

$$z''_{\tau\tau} + z = \varepsilon \left[ \left( k_1 - \frac{\delta}{\varepsilon} \right) z'_\tau + k_2 (z'_\tau)^2 + k_3 (z'_\tau)^3 + k_4 (z'_\tau)^4 + k_5 (z'_\tau)^5 \right] \tag{26}$$

посредством замены переменных:

$$x = \frac{1}{\omega_0 \beta} [z + \varepsilon k_0 + bN], \quad \tau = \omega_0 t,$$

$$\varepsilon = (p - b)N, \quad N = g\beta/\omega_0,$$

$\delta = h/(m\omega_0)$  – безразмерное демпфирование колебаний,

$g$  – ускорение свободного падения,

$\omega_0 = (k/m)^{1/2}$  – частота собственных колебаний блока.

В экспериментах определялись числа  $p, b, \beta$ . Их значения были либо  $p = 0,620; b = 0,540; \beta = 0,166$  с/микромметр, либо  $p = 0,625; b = 0,585; \beta = 0,30$  с/микромметр. Как видим, они достаточно близки друг к другу.

Наконец,

$$s = \beta v_0 - \text{скорость края разлома,}$$

и

$$\begin{aligned} k_0 &= 1 - s + s^2 - s^3 + s^4 - s^5, \\ k_1 &= 1 - 2s + 3s^2 - 4s^3 + 5s^4, \\ k_2 &= 1 - 3s + 6s^2 - 10s^3, \\ k_3 &= 1 - 4s + 10s^2, \\ k_4 &= 1 - 5s, \\ k_5 &= 1. \end{aligned} \tag{27}$$

Решение уравнения (26) ищем приближённо (с достаточной для практики точностью), используя метод медленно меняющихся амплитуд. Согласно этому методу решение уравнения (26) записывается в виде

$$z = a(\tau) \cos[\tau + \theta(\tau)], \tag{28}$$

и имеем уравнения для амплитуды  $a(t)$  и фазы  $q(t)$ :

$$a'_\tau = -\varepsilon \sin(\tau + \theta) f(z_\tau), \tag{29}$$

$$a\theta'_\tau = -\varepsilon \cos(\tau + \theta) f(z_\tau), \tag{30}$$

где

$$f(z_\tau) = \left(k_1 - \frac{\delta}{\varepsilon}\right) z'_\tau + k_2 (z'_\tau)^2 + k_3 (z'_\tau)^3 + k_4 (z'_\tau)^4 + k_5 (z'_\tau)^5. \tag{31}$$

После осреднения уравнений (29), (30) по периоду  $2\pi$ , в течение которого амплитуда и фаза почти не меняются, получим уравнение для амплитуды  $a$

$$\frac{da}{d\tau} = Co \cdot a + \lambda a^3 + ea^5, \tag{32}$$

с коэффициентами

$$Co = \frac{\varepsilon}{2} \left(k_1 - \frac{\delta}{\varepsilon}\right), \quad \lambda = \frac{3\varepsilon}{8} k_3, \quad e = \frac{5\varepsilon}{16} k_5.$$

Уравнение для фазы после осреднения приводит к решению  $\theta = const$ , т. е. фаза колебаний не меняется со временем. Произвольность фазы позволяет считать её степенью свободы данной динамической системы.

Уравнение (32) запишем в виде

$$\frac{da}{d\tau} = -\frac{\partial V}{\partial a}, \tag{33}$$

$$V(a) = \frac{Co}{2}a^2 + \frac{\lambda}{4}a^4 + \frac{e}{6}a^6. \quad (34)$$

Мы видим, как пишет автор, появляется катастрофа «бабочка»<sup>2</sup>, которая управляет амплитудой смещения краёв разлома. Это говорит о том, что в предыдущем параграфе, где авторы используют в своих рассуждениях катастрофу «сборка», следовало бы опираться на катастрофу «бабочка». Впрочем, их статью [11] можно переписать, заменив «сборку» на «бабочку».

Отсутствие нечётных степеней в выражении (34) говорит о *структурной неустойчивости* данного описания динамики разлома, т. е. правая часть уравнения (33) не является инвариантной при малых шевелениях переменной и параметров.

Посмотрим, какой смысл имеют управляющие параметры  $a$ ,  $\lambda$  и  $e$ . Поскольку  $p$ ,  $b$ ,  $\omega_0$ , – константы, а  $\varepsilon$  одинаковым образом входит в эти параметры, то из предыдущих формул видно, что управляющие параметры являются функциями скорости края разлома  $s$

$$Co = f_1(s), \quad \lambda = f_2(s), \quad e = f_3(s),$$

т. е. мы имеем ситуацию с изменением управляющих параметров, задающих кривую в пространстве  $(Co, \lambda, e)$ . Следовательно, если эта кривая пересекает бифуркационное множество  $B_V$ , то возможно скачкообразное изменение величины  $x$ , т. е. скачком смещаются края разлома, что и приводит к *главному толчку* (mainshock).

Заметим, что величина  $s$ , как видно из (25), в большой степени задаёт силу трения, в силу этого следует связывать управляющие параметры с трением блока, которая сдерживает скорость движения блоков.

## 5. Разломное землетрясение как катастрофа «ласточкин хвост»

Землетрясения разнообразны, и думать, что любое из них может быть описано как катастрофа «сборка», было бы весьма наивно. В случае того, что написано в § 3, это простое постулирование «сборки», которое делалась с одной целью – выйти на теорию катастроф в описании землетрясений. В § 4 автор предлагает уже механическую модель разломного землетрясения и приходит к катастрофе «бабочка». Но только ли эти два типа катастрофы могут встречаться? Если речь идёт об описании состояния разлома только одной переменной, то возможна ещё катастрофа «ласточкин хвост».

В этом параграфе излагается механическая модель разломного землетрясения, которая как раз и приводят нас к катастрофе «ласточкин хвост» [22]. В принципе, и катастрофа «ласточкин хвост», и катастрофа «бабочка» – это всего лишь усложнения, поскольку они представляет собой своеобразный набор катастроф «сборка».

<sup>2</sup>Формально, как видно из табл. 1, у катастрофы «бабочка» коэффициент при 6-й степени равен константе, т. е. в нашем случае это коэффициент  $e$ . Поэтому говорить, что имеет место катастрофа «бабочка» не совсем правильно.

### 5.1. Смягчение повреждений и гидравлические смягчающие свойства разлома

Как и другие геоматериалы, как только напряжение достигает некоторых значений, происходит разрушение среды в зоне разлома, одновременно с этим разлом начинает дислокироваться, т. е. начинают смещаться блоки, пласты земной коры. Величина напряжения, при которой происходит дислокация разлома, называется начальной прочностью. Дислокация разлома свидетельствует о неупругом деформировании среды в зоне разлома. По мере смещения разлома породы в зоне разлома повреждаются, прочность разлома частично снижается вместе с развитием повреждения (на языке пластичности это явление называется размягчением деформации).

Большинство материалов в разломе в той или иной степени имеют трещины. Кристалльно чистая вода из горных пород глубоко под землёй может отделиться и попасть в разлом из-за тектонического движения. Вода с поверхности может проникнуть в неглубокую часть разлома. Химическое воздействие воды на заполняющий материал в разломе может частично снизить прочность разлома, это называется *гидравлическим размягчением* (на языке механики разрушения это явление называется коррозией под напряжением).

При создании нелинейной механической модели землетрясения необходимо изучить влияние различных видов причин на процесс землетрясения. Общую определяющую формулу следует значительно упростить, сохраняя при этом свойства сильной нелинейности. Простейшая формула может иметь вид нелинейной зависимости напряжения сдвига  $\tau$  в плоскости разлома от смещения разлома  $u$ .

Иначе говоря, примем, что

$$\tau = f\left(\frac{u}{u_1}\right) = \tau_0 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u}{u_1}\right)\right], \quad (35)$$

где  $\tau_0$  – начальная прочность разлома на сдвиг.

Когда касательное напряжение в плоскости разлома  $\tau < \tau_0$ , то «разлом» не смещается. Как только напряжение сдвига достигает значения  $\tau_0$ , разлом начинает смещаться. Причём вместе с увеличением смещения  $u$  напряжение сдвига  $\tau$  в плоскости уменьшается. Это показывает, что формула (35) выражает явление размягчения повреждений, где  $u_1$  – это значение  $u$ , соответствующее точке перегиба на кривой зависимости  $\tau - u$ .

Наклон кривой функции (35) при  $u = u_1$  равен

$$\left.\frac{d}{du}f\left(\frac{u}{u_1}\right)\right|_{u=u_1} = -\frac{\tau_0}{u_1}e^{-1/2} \quad (36)$$

и его абсолютное значение определяет жёсткость разлома:

$$K_f = \frac{\tau_0}{u_1}e^{-1/2}. \quad (37)$$

Для представления гидравлического умягчения мы можем ввести гипотетическую функцию гидравлического умягчения:

$$g(\zeta) = (1 - R)(1 - \zeta)^2 + R, \quad (38)$$

где переменная  $\zeta$  отражает содержание воды,  $R$  – доля прочности при насыщении,  $g(\zeta)$  – монотонно убывающая функция. Когда среда насыщенная,  $\zeta = 0$ , поэтому  $g(0) = 1$ .

Заметим, что вид функции в формуле (38) отражает экспериментальные данные по кварцевому сланцу (см.: [22]).

Если рассматривать смягчение повреждений и гидравлическое смягчение одновременно, то искомая определяющая формула разлома принимает вид:

$$\tau = f(u, \zeta) = \tau_0 g(\zeta) \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{u}{u_1} \right)^2 \right]. \quad (39)$$

При  $\zeta = 0$  формула (39) переходит в формулу (35). Тогда мы видим, что формула (35) является определяющим соотношением при абсолютно сухом материале. Для разных значений  $\zeta$  кривые формулы (39) показаны на рис. 5.

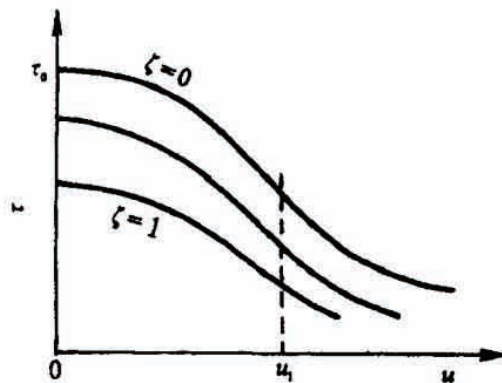


Рис. 5. Кривые для функций (39) [22]

Для всех значений  $\zeta$  абсцисса точки перегиба на кривых одна и та же, обозначим её как  $u_1$ . С увеличением  $\zeta$  абсолютная величина наклона кривых в точке перегиба постепенно уменьшается.

## 5.2. Появление катастрофы

Нелинейная механическая модель разломного землетрясения, предложенная в 1994 г. Инь и другими [22], представляет собой механическую систему, образованную сдвигом разлома (strike-slip fault) и однородной окружающей породой, как показано на рис. 6.

Примем ширину разлома равной  $2b$ , расстояние от дальней границы окружающей породы до разлома равно  $B$ , на границе тангенциальное смещение равно  $a$ , а нормальное напряжение равно нулю. Деформируемое состояние этой системы выражается смещением  $u$  (где  $u = b$ ), которое может представлять собой сдвиг разлома. Мы можем принять  $u$  как переменную состояния. Смещение в дальней зоне постепенно увеличивается от нуля до момента возникновения землетрясения, поэтому может быть управляющим параметром.

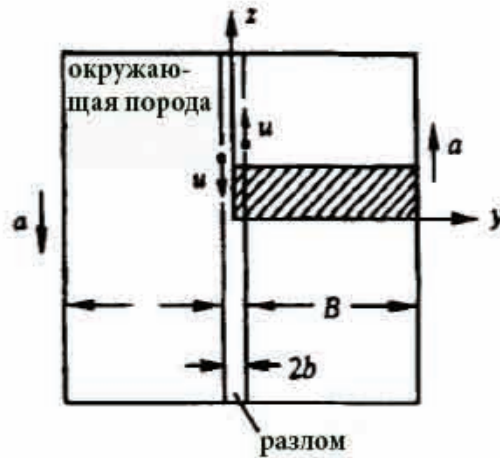


Рис. 6. Механическая модель сдвигового разломного землетрясения [22]

Разлом обладает свойствами размягчения повреждений (damage softening) и гидравлического размягчения, его определяющая связь даётся формулой (39). Окружающая порода является чисто упругой, её модуль упругости при сдвиге выражается через  $G$ . Предполагая, что деформации в зоне разлома и в окружающей породе однородны, мы можем просто изучить полосу, длина которой по простиранию и глубина равны единице (заштрихованная область на рис. 6).

Полная потенциальная энергия рассматриваемой системы разлом – окружение равна:

$$V(u, \zeta) = \frac{G \cdot (a - u)^2}{2B} + \int_0^u \tau_0 g(\zeta) \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{u}{u_1} \right)^2 \right] du. \quad (40)$$

В формуле (40) первое слагаемое справа – это упругая потенциальная энергия окружающих пород, второе слагаемое – диссипативная энергия разлома. Разложим полную потенциальную энергию  $V(u, \zeta)$  в степенной ряд при  $u = 0$  и сократим его до члена пятого порядка. Получаем

$$V = \frac{Ga^2}{2B} + u \left[ -\frac{Ga}{B} + \tau_0 g(\zeta) \right] + u^2 \left( \frac{G}{2B} \right) + u^3 \left[ -\frac{\tau_0 g(\zeta)}{6u_1^2} \right] + u^5 \left( \frac{\tau_0}{40u_1^4} \right). \quad (41)$$

Стоит отметить, что если разложить формулу (40) в точке  $u = \pm\sqrt{3}u_1$ , то можно также получить ряд, коэффициент которого при члене четвёртого порядка равен нулю, а коэффициент при члене пятого порядка отрицателен. Используя безразмерную переменную состояния:

$$x = \frac{u}{u_1} \quad (42)$$

и безразмерные управляющие переменные

$$p = -4g(\zeta), \quad (43)$$

$$q = 8\lambda e^{-1/2}, \quad (44)$$

$$r = -8e^{-1/2}\lambda\xi + 8g(\zeta), \quad (45)$$

уравнение (41) перепишем в виде

$$V = -\frac{\tau_0 u_1}{8} \left( \frac{1}{5}x^5 + \frac{p}{3}x^3 + \frac{q}{2}x^2 + rx + s \right). \quad (46)$$

В уравнениях (43), (44), (45)  $g(\zeta)$  – коэффициент гидравлического размягчения, определяемый формулой (38),  $\lambda$  – коэффициент жёсткости, связывающий окружающую породу с разломом:

$$\lambda = \frac{G}{B} : K_f = \frac{G}{B} : \frac{\tau_0 e^{-1/2}}{u_1}, \quad (47)$$

но  $\xi$  представляет собой отношение смещения в дальней зоне к  $u_1$  и называется параметром смещения в дальней зоне:

$$\xi = \frac{a}{u_1}. \quad (48)$$

Из условия стационарного равновесия изучаемой системы

$$\frac{dV}{dx} = 0$$

находим поверхность равновесия:

$$C_V = \{(x, p, q, r) : x^4 + px^2 + qx + r = 0\}. \quad (49)$$

Приведённая выше формула представляет собой стандартную форму равновесной поверхности катастрофической модели типа «ласточкин хвост».

Множество особенностей

$$\Sigma_V = \{(x, p, q, r) : 4x^3 + 2px + q = 0\} \quad (50)$$

является подмножеством множества (49). Исключая  $x$  из уравнений в (49), (50), получаем бифуркационное множество  $B_V$  в пространстве  $(p, q, r)$  (см. рис. 7).

Изменения потенциальной функции  $V = V(x, p, q, r)$  при  $p = const > 0$  показаны на рис. 8.

Нас интересует смысл управляющих параметров  $p, q, r$ .

Из формулы (38) видно, что  $p$  – это гидравлическое умягчение, из (44), что  $q$  – жёсткость среды, и, наконец, (45) говорит, что  $r$  – функция гидравлического умягчения, жёсткости и смещения в дальней зоне разлома.

Изменения этих параметров, значения которых сами определяются величинами  $\zeta, R, \xi$ , в принципе, неплохо согласуются, как показано в [22], с рядом наблюдаемых природных ситуаций. В заключении авторы этой статьи пишут, что хотя ими получены некоторые количественные результаты, в силу того, что предложенная катастрофическая модель имеет только одну переменную состояния, она слишком проста, но у них есть ещё несколько вдохновляющих идей с большей значимостью. Увы, мы их соответствующих публикаций на английском языке не нашли.



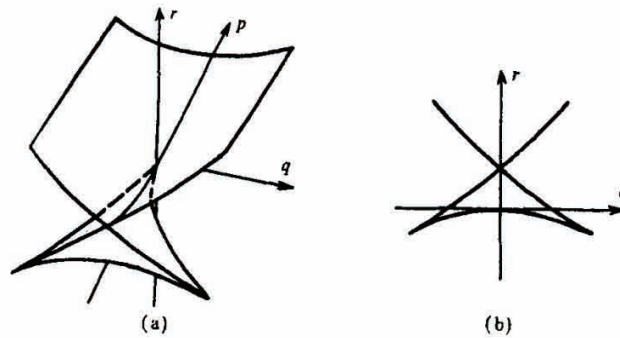


Рис. 7. (а) Бифуркационное множество  $B_V$ ; (б) Пересечение плоскости  $p = const$  с  $B_V$  [22]. Видим «клювики», характерные для бифуркационного множества катастрофы «сборка»

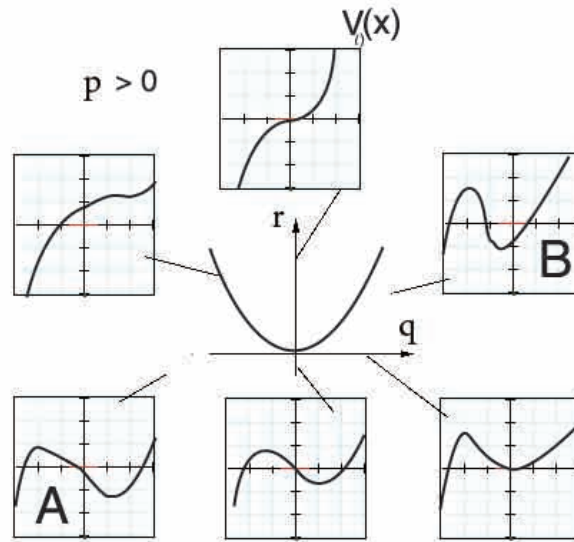


Рис. 8. «Ласточкин хвост». Динамика появления и исчезновения максимумов и минимумов у функции  $V_{(p,q,r)}(x)$  в сечении  $p = const > 0$ . При переходе через  $B_V$  рождается или умирает равновесие

## 6. Землетрясения как катастрофа «складки»

Разломное землетрясение имеет три основные формы: сдвиговое (strike-slip fault), надвиговое (thrust fault) и сбросовое (normal fault). Кроме того, существуют и некоторые другие комбинированные формы (см. рис. 1). Интенсивность и магнитуда землетрясения надвигового разлома (thrust fault, взброс) выше, чем землетрясения сдвигового разлома, и ущерб более серьёзен [4].

### 6.1. Надвиговое землетрясение как «складка»

Механизм удара (толчка) надвигового (thrust fault, взброс) землетрясения представлен на рис. 9. Изображена зона разлома, или узкая зона разлома, образовавшаяся давным-давно в левом верхнем и правом нижнем углах дальнего поля. Цельная

порода между зоной разлома и узкой зоной разлома называется каменным мостом. Нетронутый массив горных пород на рис. 9 можно также представить как комплекс некоторых каменных перемычек в несовершенном разломе и выступающей части массива. Наибольшее главное напряжение  $\sigma_1$  и наименьшее главное напряжение  $\sigma_3$  параллельны соответственно осям  $x$  и  $y$  (главной) плоскости  $xy$ , а промежуточное главное напряжение  $\sigma_2$  перпендикулярно плоскости  $xy$ .

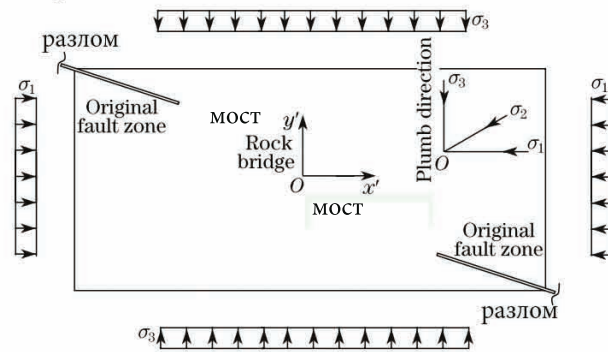


Рис. 9. Модель надвигового разлома [4]

Сила тяжести вышележащих мягких пород и (морской) воды составляет  $\sigma_3$  и  $\sigma_1 \gg \sigma_3$ .

Концы исходных разломов будут расширяться под действием  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ . Следовательно, висячие стенки и подошвы первоначальных разломов не будут находиться в одной плоскости.

При растрескивании цельной породы из-за эффекта централизации пластической деформации породы зона разрушения представляет собой узкую зону вдоль линии окончания исходного разлома. Эта зона есть зона потенциального разлома перед главным толчком и зоной новообразованного разлома после главного толчка. Когда каменный мост разрушается и образуется вторичный разлом, правая окружающая порода резко поднимается вверх, происходит толчковое надвиговое землетрясение.

Основная модель анализа ударных воздействий землетрясения с надвиговым разломом показана на рис. 10. На рис. 10(а) пунктирная часть (ширина  $2l$ ) – это потенциальная зона разлома, угол между потенциальным разломом и наибольшим главным напряжением  $\sigma_1$  есть  $\psi < 45^\circ$  ( $\xi = 90^\circ - \psi > 45^\circ$ ).

На рис. 10  $v_l$  и  $u_l$  – это касательное и продольное смещения при  $x = -l$ , соответственно,  $\rho_l = \sqrt{u_l^2 + v_l^2}$ ,  $v_L$  и  $u_L$  при  $x = -(l + L)$ ,  $\rho_L = \sqrt{u_L^2 + v_L^2}$ ,  $\rho_l = \sqrt{u_l^2 + v_l^2}$ .

Анализируя данные модели, авторы приходят к формуле:

$$\left( \frac{v_l - v_{lt}}{v_{lt}} + \frac{m}{(1+m)^2}(1-K) \right)^2 - \frac{m^2}{(1+m)^4}(1-K)^2 - \frac{2(1-K)}{(1+m)^2} - \frac{2KJ}{Q(v_{lt})(1+m)^2} = 0, \quad (51)$$

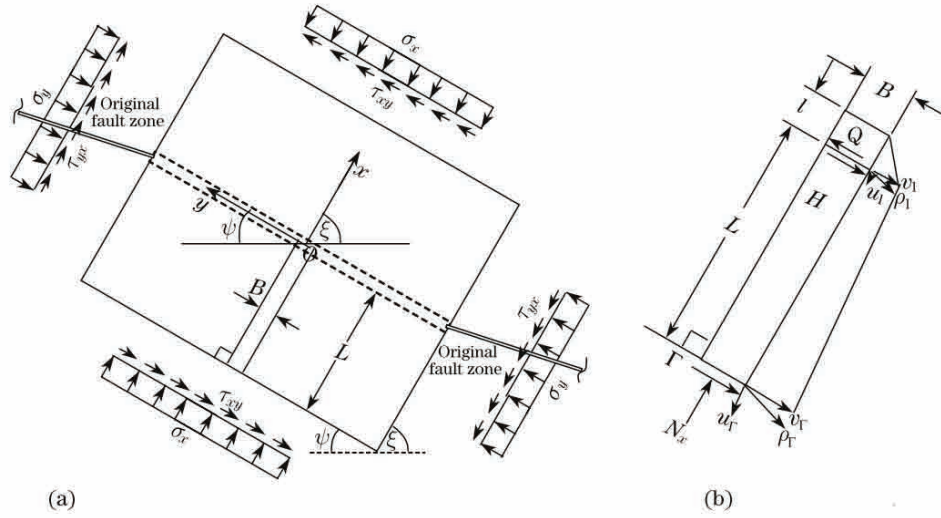


Рис. 10. Модель надвигового разлома в деталях [4]: (а) Основная модель удара: 3-мерный блок, размер которого равен  $(L + l) \times B \times D$ ; (б) Модель с половинной полосой: половина полосы, взятой из 3-мерного (3D) большого грунта, см. (а) (размер которого в 3D равен  $(L + l) \times B \times D$ )

где

$$K = \frac{k_L}{\eta m} = \frac{Gl}{gLm} \exp\left(\frac{1+m}{m}\right). \quad (52)$$

Здесь

$k_L = GBD/L$  – тангенциальная жёсткость окружающей полоски породы;

$$\Gamma = k_L v_L;$$

$$\eta = \frac{gBD}{l} \exp\left(-\frac{1+m}{m}\right).$$

$Q(v_l)$  – сила сдвига при  $x = -l$  в опоре (подошве) окружающей породы;

$J$  – энергия окружающей потенциальной зоны разлома горной породы, вводимая сдвигом  $\Gamma$  (см. рис. 10 (б)), производящим работу на границе  $x = -(L + l)$  дальнего поля, когда потенциальная зона разлома имеет единичную деформацию  $\delta v_l (> 0)$ ;

$m$  – натуральное число (чем больше  $m$ , тем круче (sleeper) зона размягчения);

$v_{lt}$  – деформация в точке перегиба  $t$  в зоне размягчения кривой  $Q(v_l)$ , удовлетворяющая условию  $Q''(v_{lt}) = 0$  на рис. 11.

Формула (51) объявляется авторами условием равновесия системы полуполосы окружающей горной породы – потенциальный разлом.

Какие для этого есть основания?

Пусть

$$\begin{cases} w = \frac{v_l - v_{lt}}{v_{lt}} + \frac{m}{(1+m)^2} (1-K), \\ a = -\frac{m^2}{(1+m)^4} (1-K)^2 - \frac{2(1-K)}{(1+m)^2} - \frac{2KJ}{Q(v_{lt})(1+m)^2}. \end{cases} \quad (53)$$

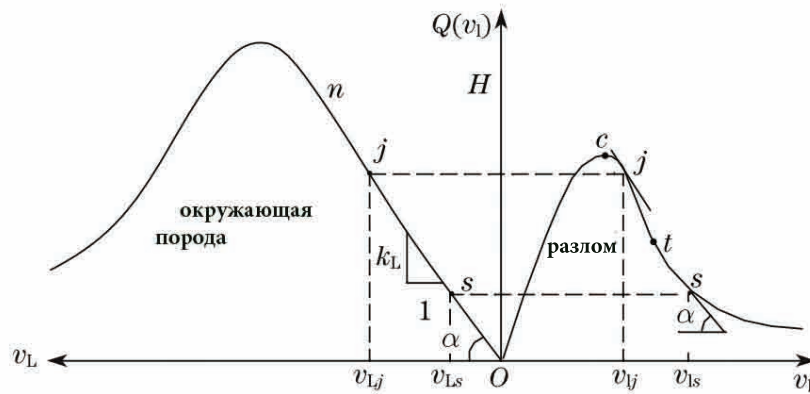


Рис. 11. Взаимосвязь между сдвиговыми и боковыми смещениями в полуплоскости окружающей породы и потенциальной зоной разлома [4]

Тогда (51) можно переписать в виде

$$w^2 + a = 0. \tag{54}$$

Как видим, формула (54) – это условие равновесия при катастрофе «складка», где  $w$  – переменная состояния, а  $a$  – управляющий параметр.

Кривая (54) представляет собой параболу в плоскости  $w - a$ . Прямая линия  $w = 0$  делит параболу на верхнюю и нижнюю ветви точно так же, как показано на рис. 12.

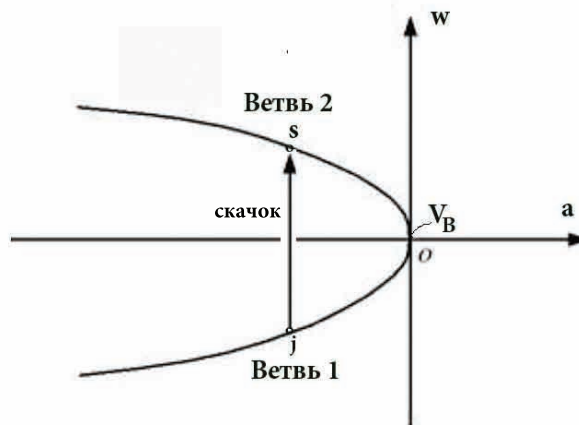


Рис. 12. Поверхность равновесия катастрофы «складка» и бифуркационное множество  $V_B = \{0\}$

Величина  $K$  – важный параметр изучаемой системы, а именно отношение жесткости окружающей породы  $k_L$  к  $|Q'(v_i)|$  равно  $\eta t$ .

Для уравнения (54) находим соответствующую потенциальную функцию

$$V(w, a) = \frac{1}{3}w^3 + aw.$$

Поэтому на ветви 1 и ветви 2 имеем соответственно:

$$\frac{\partial V}{\partial w} < 0 \text{ и } \frac{\partial V}{\partial w} > 0.$$

Отсюда следует, что равновесное состояние системы неустойчиво на ветви 1, а равновесное состояние системы устойчиво на ветви 2. Именно основной толчок землетрясения в результате надвигового разлома приводит к тому, что положение равновесия системы в конечном итоге достигает ветви 2 на рис. 12.

Катастрофа «складка» характерна для триггерных систем, т. е. для систем, которые могут долго находиться в устойчивом равновесии, в устойчивом минимуме потенциальной энергии  $V$ . Это происходит, когда система находится на ветви 1 и при медленном изменении параметра  $a$ . Система движется по равновесиям ветви 1.

Но если  $a = 0$ , устойчивые и неустойчивые экстремумы функции  $V$  встречаются и исчезают. Это точка бифуркации  $V_B = \{(0, 0)\}$ . При  $a > 0$  уже не существует устойчивого равновесия, будущее системы непредсказуемо. Для моделируемого нами землетрясения с надвиговым разломом посредством катастрофы «складка», сказанное означает следующее.

Для  $a < 0$  система имеет два положения равновесия. Конечное положение равновесия системы будет изменяться от неустойчивой ветви 1 к устойчивой ветви 2. Именно основной толчок землетрясения при надвиговом разломе приводит к тому, что положение равновесия системы в конечном итоге скачком достигает ветви 2 на рис. 12. Но для некоторого  $K > 1$  параметр  $a \geq 0$  и отсутствуют равновесия. Тогда происходит «уход системы на бесконечность», что означает разрушительное землетрясение.

Наконец, ответим на традиционный вопрос о смысле управляющего параметра  $a$ ? Из (53) видим, что  $a$  связана с величинами  $J$  и  $Q$ , т. е. с энергией окружающей потенциальной зоны разлома горной породы, обязанной сдвигу  $\Gamma$ , производящему работу на границе  $x = -(L + l)$ . Переменная состояния  $w$  – это относительное смещение (деформация) в разломе при  $x = -l$ .

## 6.2. Сдвиговое землетрясение как «складка»

В статье [3] авторы изучали сдвиговое (strike-slip fault) землетрясение.

На рис. 13 представлена модель разломного землетрясения с направлением дислокации разлома, близким к горизонтальному. Существует определённый угол между осью касательного напряжения и поверхностью причинного разлома. Здесь окружающая порода и разлом сложены различными однородными горными массивами. Ширина полосы разлома и расстояние от внешней границы окружающей породы до разлома равны  $2l$  и  $L$  соответственно. На границе дальнего поля имеются равномерные касательные напряжения  $\tau_{xy} = \tau$ , равномерные напряжения сжатия  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  ( $\sigma_x > \sigma_y$ ), которые являются внешней силой, окружающей системы горных пород-разломов. При этих внешних нагрузках напряжения в окружающей породе и разломе одинаковы. Однако из-за различных сред, определяющих соотношение, степени деформации в окружающей породе и разломе различны. Происходит постепенно увеличивающееся смещение  $\rho_\Gamma = \sqrt{v_\Gamma^2 + u_\Gamma^2}$  на границе  $(L + l)$  дальнего поля,

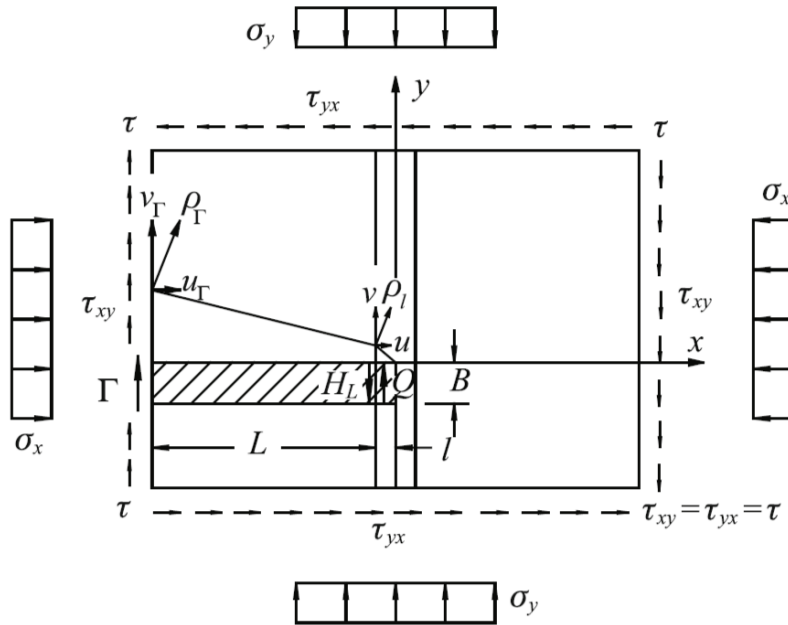


Рис. 13. Модель сдвигового землетрясения

где  $v_\Gamma$  и  $u_\Gamma$  – тангенциальное смещение и нормальное смещение при  $x = -(L + l)$ . Имеется соответствующее смещение  $\rho_l = \sqrt{v^2 + u^2}$  на краю разлома  $l$ , где  $v$  и  $u$  – соответственно тангенциальное смещение и нормальное смещение при  $x = -l$ .

Исследуя данную модель, авторы приходят к формулам, похожим на формулы из § 6.1:

$$\left( \frac{v - v_t}{v_t} + \frac{m}{(1 + m)^2} (1 - K) \right)^2 - \frac{m^2}{(1 + m)^4} (1 - K)^2 - \frac{2(1 - K)}{(1 + m)^2} - \frac{2KJ}{Q(v_t)(1 + m)^2} = 0, \quad (55)$$

где

$$K = \frac{k_L}{\eta m} = \frac{Gl}{gLm} \exp\left(\frac{1 + m}{m}\right). \quad (56)$$

Полагая, что

$$\begin{cases} w = \frac{v - v_t}{v_t} + \frac{m}{(1 + m)^2} (1 - K), \\ a = -\frac{m^2}{(1 + m)^4} (1 - K)^2 - \frac{2(1 - K)}{(1 + m)^2} - \frac{2KJ}{Q(v_t)(1 + m)^2}, \end{cases} \quad (57)$$

перепишем (55) в виде

$$w^2 + a = 0. \quad (58)$$

Как видим, также приходим к условию равновесия при катастрофе «складка», где  $w$  – переменная состояния, а  $a$  – управляющий параметр.

## 7. Катастрофа «сборка» для сдвигового разлома

Продemonстрируем описание сдвигового землетрясения с помощью катастрофы «сборка», используя статью китайских авторов Чена, Ванга и Дайяна [5].

Рассмотрим горизонтальное простирание разлома и однородную породу, представляющие собой механическую систему, как показано на рис. 14. Расстояние от границы дальнего поля до края зоны разлома равно  $B$ , а ширина зоны разлома равна  $2b$ , а координаты  $(u, v, z)$  установлены, как показано на рис. 14.

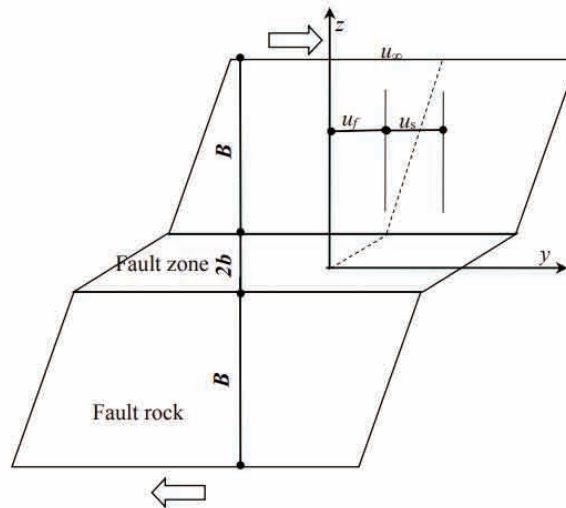


Рис. 14. Модель сдвигового разлома [5]

Пусть смещение дальнего поля равно  $u_\infty$ , смещение разлома –  $u_f$  и смещение окружающей породы –  $u_s$ :

$$u_\infty = u_f + u_s. \quad (59)$$

Полагаем, что окружающая порода является изотропной упругой средой, которая удовлетворяет закону Гука:

$$\tau_s = G_s \gamma_s, \quad (60)$$

где  $\tau_s$  – напряжение сдвига окружающей породы;  $G_s$  – жесткость породы при сдвиге;  $\gamma_s$  – деформация породы при сдвиге. Для удобства перепишем его через  $R_s$  – усилие сдвига и сдвиговое перемещение  $u_s$ :

$$R_s = K_s u_s, \quad (61)$$

где  $K_s = G_s A/B$ ,  $A$  – площадь поперечного сечения разлома, окружающего систему горных пород.

Основываясь на неоднородности прочности поверхности разлома, процесс макроразрушения поверхности разлома рассматриваем как процесс накопления локального микроэлемента разлома. Предполагается, что локальная интенсивность разлома по микроэлементам соответствует распределению вероятности Вейбулла

[6]. Соотношение напряжений и деформаций в зоне разлома принимается в виде отрицательной экспоненциальной формы [7]:

$$\tau_f = G_f \gamma_f e^{-\left(\frac{\gamma_f}{\gamma_0}\right)^m}. \quad (62)$$

В уравнении (62)  $\tau_f$  – напряжение сдвига;  $G_f$  – начальная жесткость (разлома) при сдвиге;  $\gamma_f$  – деформация при сдвиге. Сдвиговое смещение  $u_f$  зоны разлома и деформация  $\gamma_f$  удовлетворяют геометрическому уравнению:

$$\gamma_f = \frac{u_f}{b}. \quad (63)$$

Полагая, что  $K_f = G_f A/b$ , соотношение между сдвигающей силой и сдвиговым смещением зоны разлома запишем как

$$R_f = K_f u_f e^{-\left(\frac{u_f}{u_0}\right)^m}, \quad (64)$$

где  $u_0$  – постоянная величина;  $m$  – параметр формы, который связан с механическими свойствами среды разлома (график функции показан на рис. 15).

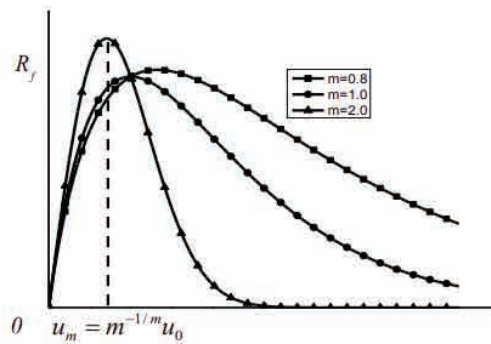


Рис. 15. График функции  $G_f$  [5]

Независимо от влияния силы тяжести общая потенциальная энергия системы горных пород, окружающих разлом, равна

$$V = \int_u^{u_\infty} R_s du_s + \int_0^u R_f du = \int_u^{u_\infty} K_s u_s du_s + \int_0^u K_f u e^{-\left(\frac{u}{u_0}\right)^m} du. \quad (65)$$

Из (65) получаем уравнение поверхности равновесия

$$V' = K_f u e^{-\left(\frac{u}{u_0}\right)^m} + K_s (u_\infty - u) = 0. \quad (66)$$

Уравнение (66) раскладываем в степенной ряд по  $u$  в точке перегиба

$$u = u^* = \left(\frac{m+1}{m}\right)^{1/m}$$



кривой  $R_f$ . Пренебрегая членами выше третьего порядка, получаем:

$$K_f \cdot u^* \cdot e^{-\left(\frac{u^*}{u_0}\right)^m} + K_s \cdot (u_\infty - u^*) + \left( K_f \cdot e^{-\left(\frac{u^*}{u_0}\right)^m} \cdot \left(1 - m \left(\frac{u^*}{u_0}\right)^m\right) + K_s \right) (u - u^*) - \\ - \frac{1}{2} m \cdot K_f \cdot \frac{(u^*)^{m-1}}{u_0^m} \cdot e^{-\left(\frac{u^*}{u_0}\right)^m} \cdot \left( m + 1 - m \cdot \left(\frac{u^*}{u_0}\right)^m \right) \cdot (u - u^*)^2 - \frac{1}{6} m K_f \cdot e^{-\left(\frac{u^*}{u_0}\right)^m} \cdot \\ \cdot \left( (m^2 - 1) \cdot \frac{(u^*)^{m-2}}{u_0^m} - 3m^2 \cdot \frac{(u^*)^{2m-2}}{u_0^{2m}} + m^2 \cdot \frac{(u^*)^{3m-2}}{u_0^{3m}} \right) \cdot (u - u^*)^3 = 0 \quad (67)$$

Подставляя значение  $u^* = \sqrt[m]{\frac{m+1}{m}} \cdot u_0$ , уравнение (67) перепишем как

$$\left( \frac{u - u^*}{u} \right)^3 + \frac{6}{m \cdot (m+1)^2} \cdot \left( \frac{K_s}{K_f \cdot e^{-\frac{m+1}{m}}} - m \right) \left( \frac{u - u^*}{u^*} \right) + \\ + \frac{6}{m \cdot (m+1)^2} \cdot \left( 1 - \frac{K_s}{K_f \cdot e^{-\frac{m+1}{m}}} \left( \frac{u_\infty - u^*}{u^*} \right) \right) = 0. \quad (68)$$

Пусть

$$K = \frac{K_s}{K_f m e^{-\frac{m+1}{m}}} = \frac{G_s b}{G_f B} = \frac{G_s b}{G_f B} = \frac{\text{(жесткость породы при сдвиге в блоке)}}{\text{(начальная жесткость в разломе)}} \cdot \frac{b}{B}, \quad (69)$$

$$\xi = \frac{u_\infty - u^*}{u^*} - \text{смещение в дальнем поле минус } u^*, \quad (70)$$

$$x = \frac{u - u^*}{u^*} = \frac{u_f - u^*}{u^*} - \text{безразмерное смещение в разломе}, \quad (71)$$

$$p = \frac{6}{(m+1)^2} \cdot (K - 1) - \text{отношение жесткостей в блоке и в разломе}, \quad (72)$$

$$q = \frac{6}{(m+1)^2} \cdot \left( \frac{1}{m} - K\xi \right) - \text{отношение жесткостей в блоке и в разломе (смещение } \xi). \quad (73)$$

Тогда уравнение (68) запишется в виде

$$x^3 + px + q = 0. \quad (74)$$

А это, как мы знаем, есть уравнения поверхности равновесия для катастрофы «сборка» с потенциальной функцией

$$V = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}px^2 + qx.$$

Таким образом, сдвиговый разлом, а значит и сдвиговое землетрясение, может описываться катастрофой «сборка». Смысл переменных  $x, p, q$  дан в формулах (70) – (73).

## 8. Заключение

В обзоре представлены, на наш взгляд, ключевые статьи по теоретико-катастрофическому описанию землетрясений. В отличие, скажем, от теоретико-катастрофического описания оползней [32], при изучении землетрясений задействованы все катастрофы Тома с одной переменной состояния системы.

Основные результаты в направлении были получены в Китае [3–5, 11, 13–15, 22, 24, 26], а в 2010-е гг. в России [18–21, 31].

## 9. Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания «Эволюция окружающей среды и климата вследствие естественных причин и антропогенного воздействия» (FGRW-2021-0015, № госрегистрации 122032300363-3).

## Литература

1. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и её приложения. М. : Мир, 1982. 608 с.
2. Rial J.A. Caustics and focusing produced by sedimentary basins: applications of catastrophe theory to earthquake seismology // *Geophysical Journal International*. 1984. Vol. 79. P. 923–938.
3. Pan Y., Li A. Fold catastrophe model of strike-slip fault earthquake // *Appl. Math. Mech. Engl. Ed.* 2010. Vol. 31 (3). P. 349–362.
4. Pan Y., Zhao Z. Analysis of main shock of thrust fault earthquake by catastrophe theory // *Appl. Math. Mech. Engl. Ed.* 2012. Vol. 33 (7). P. 845–864.
5. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М., 1991. 224 с.
6. Wald L. The Science of Earthquakes By Earthquake Hazards Program. URL: <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/science-earthquakes> (дата обращения 08.11.2023).
7. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М. : Наука, 1975. 536 с.
8. Добровольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М. : Физматлит, 2009. 235 с.
9. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М. : Наука, 1975. 172 с.
10. Катастрофы и катаклизмы / сост.: Н. Непомнящий, М. Курушин. М. : ОЛМА Медиа Групп, 2010. С. 12–13.
11. Dingwen L., Jingyao W., Yongjuan W. Application of catastrophe theory in earthquake hazard assessment and earthquake prediction research // *Tectonophysics*. 1989. Vol. 767. P. 179–186.
12. Dingwen L., Jingyao W., Yongluan W. Some catastrophe models for non-static tectonic movement and their significance to the study of earthquake generation conditions // *Proc. Chinese Symp. Tectonophys.* 2nd. 1989 (in Chinese).
13. Kang Z.Y. A cusp catastrophe model of interpret loss of stable equilibrium in rock quasi-static movement // *Acta Seismologica Sinica*. 1984. Vol. 6. P. 352–361 (in Chinese).
14. Yin Y.Q., Zheng G.T. A cusp type catastrophic model of fault earthquake // *Acta Geophysica Sinica*. 1988. Vol. 31 (6). P. 657–664 (in Chinese).

15. Yong X.X., Yin Y.Q., Kang Z.Y., Liu G.X., Wang T.W. The cusp type catastrophe analyses of compresso-shear fault earthquake // *Science China Chemistry*. 1994. Vol. 24 (6). P. 656–663 (in Chinese).
16. Физика землетрясений / под ред. М.А. Садовского. М. : Наука, 1975. 214 с.
17. Мячкин В.И., Воевода И.Д. Предположения о статистической теории подготовки землетрясений // *Физика землетрясений*. М. : Наука, 1975. С. 45–57.
18. Арсеньев С.А. Землетрясения с точки зрения теории катастроф // *Триггерные эффекты в геосистемах: материалы IV Всероссийской конференции с международным участием*. М. : ГЕОС, 2017. С. 52–59.
19. Arsen'yev S.A. Sliding friction as mechanism for onset of tectonic earthquakes // *Tectonophysics and actual topics in the Earth's Sciences: Proceed. of the IV All-Russian Conf. Russian Academy of Sciences*. Moscow, 2016. С. 423–429 (in Russian).
20. Arsen'yev A.A., Eppelbaum L.V., Meirova T. Earthquake Processes: A View from Synergetics and the Theory of Catastrophes // *Pure Appl. Geophys.* 2019. Vol. 176. P. 3377–3390.
21. Арсеньев С.А. Возникновение землетрясений в активных разломах // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2017. № 4–2. С. 145–158.
22. Yin Y.Q., Du J. A swallow-tail type catastrophic model of earthquake process // *Acta Seismologica Sinica*. 1994. Vol. 7. P. 521–528.
23. Апродов В.А. Зоны землетрясений. М. : Мысль, 2000. 403 с.
24. Yang X.X., Yin Y.Q. Cusp type catastrophe analysis of the earthquake process of compression torsion fault. *China Science // Series Chemical Life Science Geology*, 1994. P. 656–663.
25. Chen Z., Wang W., Li D. Instability Analysis of Strike-Slip Fault Based on Cusp Catastrophe Model // *SDHM*. 2018. Vol. 12, No. 1. P. 19–33.
26. Shi Z., Luo Z., Peng D., He Z. Application of catastrophe theory to the analyses of mechanism of faulting movement // *Journal of Xian Engineering University*. 1996. Vol. 18, No. 1. P. 50–55.
27. Современная трибология. Итоги и перспективы / под ред. К.В. Фролова. М. : Изд-во ЛКИ, 2014. 480 с.
28. Kong D., Hu K. Application of catastrophe theory in surrounding rock stability // *Advanced Materials Research Vols*. 2013. Vol. 712–715. P. 974–978.
29. Li E.P., Yin Y.Q. A simply model for earthquake instability // *Earthquake Research in China*. 2009. Vol. 24, No. 2. P. 179–189.
30. Stuart W.D. Strain-softening instability model for the san fernando earthquake // *Science*. 1979. Vol. 203, No. 4383. P. 907.
31. Гульельми А.В. Форшоки и афтершоки сильных землетрясения в свете теории катастроф // *УФН*. 2015. Т. 185, № 4. С. 415–429.
32. Гуц А.К. Теоретико-катастрофические модели оползневых процессов // *Математические структуры и моделирование*. 2023. № 3 (67). С. 54–70.

## **TECTONIC EARTHQUAKES AND THEORY OF CATASTROPHES**

**A.K. Guts**

Dr.Sc. (Phys.-Math.), Professor, Leading Scientist Researcher, e-mail: aguts@mail.ru

Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Sochi, Russia

**Abstract.** Review article presenting work on application of the mathematical theory of catastrophes to earthquakes. This work is mainly being successfully carried out in China and Russia. Articles were selected that reflected such disasters as “fold”, “cusp”, “swallow tail” and “butterfly”.

**Keywords:** earthquakes, catastrophe theory, review article .

*Дата поступления в редакцию: 08.11.2023*

## ПРИМЕНЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ИГР К ОПИСАНИЮ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А.К. Гуц

доктор физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, e-mail: aguts@mail.ru

Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр  
Российской академии наук», Сочи, Россия

**Аннотация.** Применяется теория дифференциальных игр для анализа сдвигового разломного землетрясения. Найдено оптимальное равновесное управление Нэша, описывающее затухание толчков.

**Ключевые слова:** сдвиговой разлом, землетрясения, дифференциальные игры, стратегии Нэша.

### Введение

Землетрясения являются крайне опасным природным явлением, которое приносит много бед людям и экономике. Если сконцентрировать внимание на тектонических землетрясениях, то первое к чему обращается исследователь, пытающийся понять природу этих землетрясений, это существующие теории их объясняющие. Выясняется удивительная ситуация, когда авторы учебников и монографий по тектоническим землетрясениям говорят о том, что многое, касающееся структуры как земной поверхности, так и ее недр, неизвестно, предположительно или представляет набор гипотез.

Тем не менее считается, что земная поверхность, её кора, т. е. наружная твёрдая оболочка земного шара, состоит из множества каменных *блоков* (плит) определённой *породы*, которые движутся, упруго сталкиваются, трутся друг о друга, что порождает *сейсмические волны*, бегущие вдоль блоков. Преодоление блоком препятствия в виде другого блока есть преодоление, борьба с *силами трения*, что первоначально приводит к деформациям, к накоплению упругой энергии, а преодоление препятствия ведет к ее разрядке, разрушению пород, порождая толчки, ощущаемые людьми как дрожание земной поверхности, к толчкам, влекущим разрушение зданий.

Землетрясение происходит, как сказано, когда два блока внезапно скользят один по другому. Поверхность, по которой они скользят, называется *разломом* или *плоскостью разлома* [1]. Лишь немногие тектонические разломы выглядят как щелевидные полости. В большинстве случаев эти полости заполнены или обвалившимися в них обломками окружающих пород, или минеральными зёрнами, выкристаллизовавшимися из просочившихся по разломам (разрывам) подземных вод, или закристаллизовавшимися магматическими расплавами. Поэтому часто разлом (разрыв)

предстаёт перед нами в виде пластинообразного тела, которое отличается от окружающей среды (породы) меньшей или большей прочностью, а также другими физическими свойствами. На местности одни разломы проявляются в виде цепочек озёр, долин и иных понижений рельефа. Другие разломы (разрывы), наоборот, выглядят гребнями в рельефе. Немало разломов, даже крупных, которые практически не выражены в рельефе и обнаруживаются только при сопоставлении многочисленных обнажений горных пород или проходке горных выработок [2, с. 126].

Наука стремится описать землетрясения, привлекая для этого достаточно разработанные и проверенные научные теории, составляющие такие *математизированные* направления, как механика и физика. Механика и физика занимают достойные места в науке о землетрясениях.

Но вполне естественно, описывая землетрясения, обратиться и к чисто математическим теориям. Одной из первых здесь была использована теория катастроф (см. обзор: [3]). Землетрясения в этой теории выглядят как *скачкообразные изменения состояний* (например, смещения берегов разлома) равновесия под воздействием тех или иных управляющих параметров (силами трения, энергией сдвигов пород и пр.). В принципе, это отражает то представление о ходе землетрясения, которое описано выше.

С другой стороны, землетрясение – это «борьба» различных сил, представляемых в теории как управляющие параметры, изменение которых либо ведёт к главному толчку, либо толчки спадают на нет, затихают. Такой взгляд на землетрясение наводит на мысль описать изменения управляющих параметров как в некоем роде противостояние различных подземных сил, или, как будет лучше выразиться, как *игру* разных сторон, участвующих в столкновении блоков.

Иначе говоря, в данной статье мы попытаемся описать землетрясение с помощью дифференциальной теории игр, основой которой являются дифференциальные уравнения с переменными, описывающими как состояние системы, так и управление ею [4].

## 1. Дифференциальное уравнение игры

В статье [5] китайские специалисты предложили следующую математико-механическую модель сдвигового разлома (strike-slip fault).

Рассмотрим горизонтальное простирание разлома и однородную окружающую породу (rock), воспринимаемые как механическая система, что показано на рис. 1. Расстояние от границы дальнего поля до края зоны разлома равно  $B$ , а ширина зоны разлома равна  $2b$ .

Пусть смещение дальнего поля равно  $u_\infty$ , смещение разлома –  $u_f$  и смещение окружающей породы –  $u_s$ :

$$u_\infty = u_f + u_s. \quad (1)$$

Полагаем, что окружающая порода является изотропной упругой средой, которая удовлетворяет закону Гука:

$$\tau_s = G_s \gamma_s, \quad (2)$$

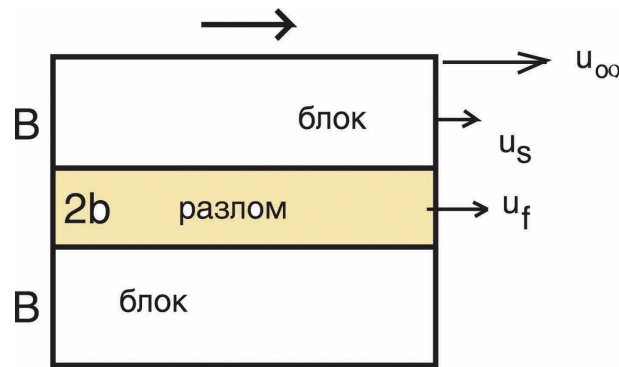


Рис. 1. Модель сдвигового разлома

где  $\tau_s$  – напряжение сдвига окружающей породы;  $G_s$  – жёсткость породы при сдвиге;  $\gamma_s$  – деформация породы при сдвиге. Для удобства представим его через  $R_s$  – усилия сдвига и сдвигового перемещения  $u_s$ :

$$R_s = K_s u_s, \quad (3)$$

где  $K_s = G_s A/B$ ,  $A$  – площадь поперечного сечения разлома, окружающего систему горных пород.

Основываясь на неоднородности прочности поверхности разлома, процесс макроразрушения поверхности разлома рассматривается как процесс накопления локального микроэлемента разлома. Предполагается, что локальная интенсивность разлома по микроэлементам соответствует распределению вероятности Вейбулла [6]. Соотношение напряжений и деформаций в зоне разлома принимается в виде отрицательной экспоненциальной формы [7]:

$$\tau_f = G_f \gamma_f e^{-\left(\frac{\gamma_f}{\gamma_0}\right)^m}. \quad (4)$$

В уравнении (4)  $\tau_f$  – напряжение сдвига;  $G_f$  – начальная жёсткость (разлома) при сдвиге;  $\gamma_f$  – деформация при сдвиге. Сдвиговое смещение  $u_f$  зоны разлома и деформация  $\gamma_f$  удовлетворяют геометрическому уравнению:

$$\gamma_f = \frac{u_f}{b}. \quad (5)$$

Полагая, что  $K_f = G_f A/b$ , соотношение между сдвигающей силой и сдвиговым смещением зоны разлома перепишем как

$$R_f = K_f u_f e^{-\left(\frac{u_f}{u_0}\right)^m}, \quad (6)$$

где  $u_0$  – постоянная величина;  $m$  – параметр формы, который связан с механическими свойствами среды разлома.

Для удобства пишем  $u_f = u$ .

Независимо от влияния силы тяжести общая потенциальная энергия системы горных пород, окружающих разлом, равна

$$V = \int_u^{u_\infty} R_s du_s + \int_0^u R_f du = \int_u^{u_\infty} K_s u_s du_s + \int_0^u K_f u e^{-\left(\frac{u}{u_0}\right)^m} du. \quad (7)$$

Из (7) получаем уравнение поверхности равновесия

$$V' = K_f u e^{-\left(\frac{u}{u_0}\right)^m} + K_s (u_\infty - u) = 0. \quad (8)$$

После некоторых преобразований (см. [5]) уравнения (8), разложения его в ряд Тейлора по  $u$  в точке  $u = u^* = \left(\frac{m+1}{m}\right)^{1/m}$  и пренебрежения членами разложения выше третьего получаем уравнение

$$\begin{aligned} &\left(\frac{u - u^*}{u^*}\right)^3 + \frac{6}{m \cdot (m + 1)^2} \cdot \left(\frac{K_s}{K_f \cdot e^{-\frac{m+1}{m}}} - m\right) \left(\frac{u - u^*}{u^*}\right) + \\ &+ \frac{6}{m \cdot (m + 1)^2} \cdot \left(1 - \frac{K_s}{K_f \cdot e^{-\frac{m+1}{m}}} \left(\frac{u_\infty - u^*}{u^*}\right)\right) = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Пусть

$$K = \frac{K_s}{K_f m e^{-\frac{m+1}{m}}} = \frac{G_s b}{G_f B} = \frac{G_s b}{G_f B} = \frac{\text{(жесткость породы при сдвиге в блоке)}}{\text{(начальная жесткость в разломе)}} \cdot \frac{b}{B}, \quad (10)$$

$$\xi = \frac{u_\infty - u^*}{u^*} - \text{смещение в дальнем поле минус } u^*, \quad (11)$$

$$x = \frac{u - u^*}{u^*} = \frac{u_f - u^*}{u^*} - \text{безразмерное смещение в разломе}, \quad (12)$$

$$p = \frac{6}{(m + 1)^2} \cdot (K - 1) - \text{отношение жесткостей в блоке и в разломе}, \quad (13)$$

$$q = \frac{6}{(m + 1)^2} \cdot \left(\frac{1}{m} - K\xi\right) - \text{отношение жесткостей в блоке и в разломе, (смещение } \xi). \quad (14)$$

Тогда уравнение (8) запишется в виде

$$x^3 + px + q = 0. \quad (15)$$

А это, как мы знаем, есть уравнение поверхности равновесия для катастрофы «сборка» с потенциальной функцией

$$V = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}px^2 + qx.$$

Таким образом, сдвиговый разлом, а значит, и сдвиговое землетрясение может описываться катастрофой «сборка». Смысл переменных  $x, p, q$  дан в формулах (11), (12), (13), (14),

В силу сказанного динамика сдвигового разлома описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{\partial V}{\partial x} = -x^3 - px - q. \quad (16)$$



## 2. Дифференциальные игры

Мы можем рассматривать игру двух игроков, обозначаемых  $p$  и  $q$ , которые в рамках теории катастроф рассматриваются как управляющие параметры. Из смысла этих параметров мы видим, что они достаточно независимы и в какой-то мере могут рассматриваться то как конкурирующие, то как находящиеся в компромиссном состоянии. Их игра определяет будущее движение окружающих разлом пород.

Игру рассматриваем с ненулевой суммой, поскольку трудно сказать в нашем случае, что выигрыш одного игрока – это проигрыш другого.

Будем использовать теорию дифференциальных игр с позиционным управлением  $(p, q)$ , т. е. изменение значений  $p$  и  $q$  определяется состоянием  $x$  сдвигового смещения в разломе в данный момент.

Будем искать позиционное управление Нэша. Используемая теория (см.: [4]) кратко может быть представлена следующим образом.

Наше уравнение (16) запишем как

$$\frac{dx}{dt} = f(x) + g_1(x)u_1 + g_2(x)u_2, \quad f(0) = 0,$$

$$x \in \mathbb{R}, \quad u_j \in \mathbb{R},$$

где каждое  $u_j$  – это  $j$ -й игрок, его управляющий параметр с выигрышными функциями

$$J_1(x, H, r) = \int_0^{+\infty} [Q_1(x) + p^2] dt, \quad J_2(x, H, r) = \int_0^{+\infty} [Q_2(x) + q^2] dt,$$

где  $Q_1(x), Q_2(x)$  – положительно определённые функции.

Существование управления Нэша означает выполнение неравенств:

$$J_i(u_1^*, u_2^*, u_i^*, \dots, u_N^*) \leq J_i(u_1^*, u_2^*, \dots, u_{i-1}^*, u_i, u_{i+1}^*, \dots, u_N^*), \quad \forall u_i, \quad i = 1, 2. \quad (17)$$

Задача отыскания управления Нэша сводится к крайне сложной задаче отыскания положительно определённого решения  $V_i(x) > 0$  нелинейного уравнения Гамильтона – Якоби [4]:

$$(V_i)'_x(x) f(x) + Q_i(x) - \frac{1}{2} (V_i)'_x \sum_{j=1}^2 [g_j(x)]^2 (V_j)'_x +$$

$$+ \frac{1}{4} \sum_{j=1}^2 [g_j(x)]^2 [(V_j)'_x]^2 = 0, \quad (i = 1, 2), \quad (18)$$

по которому строится управление Нэша:

$$u_i^*(x) = u_i(V_i(x)) = -\frac{1}{2} g_i(x) (V_i)'_x, \quad i = 1, 2 \quad (19)$$

в соответствии с теоремой 10.4-2 из [4].

### 3. Игра «Сдвиговый разлом»

Итак, дифференциальная игра описывается уравнением (16), игрок 1 – параметр  $u_1 = p$  – «Состав пород», игрок 2 – параметр  $u_2 = q$  – «Смещение в дали» и

$$f(x) = -x^3, \quad g_1(x) = -x, \quad g_2(x) = -1.$$

Тогда уравнения Гамильтона – Якоби принимают вид:

$$\begin{aligned} Q_1 + (V_1)'_x f(x) - \frac{1}{4}[g_1(x)]^2[(V_1)'_x]^2 - \frac{1}{2}[g_2(x)]^2(V_1)'_x(V_2)'_x &= 0, \\ Q_2 + (V_2)'_x f(x) - \frac{1}{4}[g_2(x)]^2[(V_2)'_x]^2 - \frac{1}{2}[g_1(x)]^2(V_1)'_x(V_2)'_x &= 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Следовательно, если взять

$$Q_1 = x^4 + \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}x^2, \quad Q_2 = x^4 + \frac{1}{4}x^2 + \frac{1}{2}x^4, \quad (21)$$

то уравнения Гамильтона-Якоби имеют решения:

$$V_1(x) = V_2(x) = \frac{1}{2}x^2.$$

При этом функции  $Q_1(x), Q_2(x)$  являются положительно определёнными.

Поэтому по теореме 10.4-2 из [4] имеем управление Нэша

$$p^* = \frac{1}{2}x^2, \quad q^* = \frac{1}{2}x, \quad (22)$$

найденное по формулам (19). Уравнение дифференциальной игры принимает вид

$$\frac{dx}{dt} = -x^3 - \frac{1}{2}x^3 - \frac{1}{2}x < 0. \quad (23)$$

Находим решение для (23):

$$-\frac{2}{3}t + \ln C = \int \frac{dx}{x^3 + (1/3)x} = \int \frac{dx}{x(x^2 + (1/3))} = \frac{1}{(2/3)} \ln \frac{x^2}{(1/3) + x^2},$$

или

$$\frac{x^2}{(1/3) + x^2} = C \cdot e^{-(4/9)t}.$$

Переходя к пределу по  $t \rightarrow +\infty$ , получим, что  $\lim_{t \rightarrow +\infty} x^2 = 0$ . Это говорит о том, что с течением времени смещение в разломе сойдёт на нет, т. е. толчки прекратятся, землетрясение закончится.

### 4. Заключение

Предпринятую попытку описать землетрясение как дифференциальную игру не следует рассматривать как успешную. Это было бы опрометчиво. Землетрясение – крайне сложное явление, и трудно надеяться, что само исходное для нас уравнение (16) адекватно отражает сдвиговый разлом. Но сведение динамики землетрясений к дифференциальным уравнениям, к дифференциальным играм уже имеет смысл, поскольку это означает привлечение нового и мощного математического аппарата для изучения опасного природного явления.

## 5. Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания «Эволюция окружающей среды и климата вследствие естественных причин и антропогенного воздействия» (FGRW-2021-0015, № госрегистрации 122032300363-3).

## Литература

1. Wald L. The Science of Earthquakes By Earthquake Hazards Program. URL: <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/science-earthquakes> (дата обращения 08.11.2023).
2. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М. : Наука, 1975. 536 с.
3. Гуц А.К. Тектонические землетрясения и теория катастроф // Математические структуры и моделирование. 2023. № 4 (68). С. 21–49.
4. Lewis F.L., Vrabie D.L., Syrmos V.L. Optimal Control. John Wiley & Sons, Inc., 2012.
5. Chen Z., Wang W., Li D. Instability Analysis of Strike-Slip Fault Based on Cusp Catastrophe Model // SDHM. 2018. Vol. 12, No. 1. P. 19–33.
6. Li E.P., Yin Y.Q. A simply model for earthquake instability // Earthquake Research in China. 2009. Vol. 24, No. 2. P. 179–189.
7. Stuart W.D. Strain-softening instability model for the san fernando earthquake // Science. 1979. Vol. 203, No. 4383. P. 907.

## APPLICATION OF DIFFERENTIAL GAMES TO THE DESCRIPTION OF TECTONIC EARTHQUAKES

**A.K. Guts**

Dr.Sc. (Phys.-Math.), Professor, Leading Scientist Researcher, e-mail: aguts@mail.ru

Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Sochi, Russia

**Abstract.** Differential game theory is used to analyze a shear fault earthquake. The optimal Nash equilibrium control describing the attenuation of shocks is found.

**Keywords:** shear fault, earthquakes, differential games, Nash strategies .

*Дата поступления в редакцию: 16.11.2023*

## **ОБЗОР И АПРОБИРОВАНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ**

**Д.И. Васина**

магистрант, e-mail: [basina94@mail.ru](mailto:basina94@mail.ru)

Омский государственный технический университет, Омск, Россия

**Аннотация.** Определяется растущее значение солнечной энергии в устойчивом производстве энергии. Традиционные модели прогнозирования с трудом справлялись со сложными нелинейными закономерностями, но появление методов машинного обучения значительно повысило точность и надёжность в этой области. Рассматриваются различные методики машинного обучения, используемые для прогнозирования солнечной энергии: линейная регрессия, CatBoost, XGBoost, искусственные нейронные сети. В работе объясняются математические принципы, лежащие в основе представленных методов, такие как функции потерь, ансамблевые модели, этапы градиентного спуска, термины регуляризации и конкретные функциональные формы этих методологий машинного обучения. Подчеркивается роль методов машинного обучения в значительном повышении точности и надёжности прогнозов солнечной энергетики.

**Ключевые слова:** прогнозирование выработки, машинное обучение, деревья решений, линейная регрессия, искусственные нейронные сети.

### **1. Введение**

В последние годы использование солнечной энергии стало ключевым решением в стремлении к устойчивому производству энергии. Поскольку применение солнечных технологий продолжает развиваться, надёжность и эффективность производства становятся более значимыми [1, 2]. Одной из ключевых задач, с которыми сталкиваются в этой области, является точное прогнозирование и оптимизация производства, поскольку оно зависит от динамичных и непредсказуемых факторов окружающей среды [3, 4].

Прогнозирование солнечной энергии основывалось на традиционных моделях, которые с трудом приспосабливаются к сложным, нелинейным закономерностям. Однако появление методов машинного обучения вызвало волну преобразований в этой области, предложив сложные инструменты для повышения точности и надёжности прогнозов солнечной энергии [5, 6].

В статье рассматривается применение различных методологий машинного обучения – линейной регрессии, CatBoost, XGBoost и искусственных нейронных сетей (ИНС), раскрывается их роль в повышении точности и надёжности прогнозов солнечной энергии.

### 1.1. Линейная регрессия

Линейная регрессия является фундаментальным статистическим методом, используемым в прогнозировании для установления взаимосвязи между двумя переменными.

В работе В.П. Корнеева, К.С. Хрисанфовой «Применение полиномиальных признаков в задачах линейной регрессии» линейная регрессия определяется как алгоритм машинного обучения для прогнозирования на основе линейной функции зависимости. Авторы проводят исследование сравнения эффективности линейной и полиномиальной регрессионных моделей [7].

В статье Т.А. Бойко «Разработка алгоритма построения модели множественной линейной регрессии» описывается построение модели множественной линейной регрессии, в том числе выявляется необходимость выполнения отбора независимых переменных, математическая часть построения модели и проверка точности прогнозирования. При построении модели множественной линейной регрессии автор акцентирует внимание на том, что важно учитывать  $p$ -value,  $R$ -квадрат и  $t$ -value для проверки качества модели [8].

В области прогнозирования линейная регрессия устанавливает зависимости между зависимой переменной (переменной, подлежащей прогнозированию) и одной или несколькими независимыми переменными (предикторами).

Целью модели является выделение наиболее подходящей линии, которая минимизирует разницу между прогнозируемыми значениями и фактическими. Минимизация выполняется с помощью метода наименьших квадратов, который вычисляет линию, минимизирующую сумму квадратов разностей между наблюдаемыми и прогнозируемыми значениями. Линейная регрессия может быть дополнительно расширена до множественной, где имеется более одной независимой переменной. Уравнение для множественной линейной регрессии имеет вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n, \quad (1)$$

где  $y$  – зависимая переменная;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – независимые переменные;  $b_0$  – перекхват;  $b_1, b_2, \dots, b_n$  – коэффициенты, представляющие влияние каждой независимой переменной на зависимую переменную. Как только модель линейной регрессии обучена на ретроспективных данных, ее можно использовать для прогнозирования будущих значений зависимой переменной на основе значений независимых переменных.

### 1.2. Метод ансамбля градиентного бустинга деревьев решений CatBoost

Метод CatBoost как алгоритм повышения градиента работает путём минимизации заданной функции потерь при помощи добавления деревьев решений в ансамбль. Используется аддитивная модель, в которой каждое новое дерево подгоняется к остаточным ошибкам существующего ансамбля. Окончательное предсказание – это сумма предсказаний, сделанных всеми деревьями в ансамбле.

Метод минимизирует заданную дифференцируемую функцию потерь (например, среднеквадратичную ошибку для регрессии или логарифмическую потерю для клас-

сификации) с использованием градиентного спуска. CatBoost стремится найти оптимальные параметры (древовидные структуры) путем итеративного перемещения в направлении, противоположном градиенту функции потерь.

А.Д. Моргоева, Р.В. Ключев в своей научной работе «Прогнозирование потребления электрической энергии промышленным предприятием с помощью методов машинного обучения» утверждают, что развитие и применение методов интеллектуального анализа данных способствует уменьшению и рационализации использования ресурсов. В статье описано исследование, которое проводилось на промышленном предприятии с энергоёмким и устаревшим оборудованием. По его результатам авторы делают вывод, что модель машинного обучения, основанная на алгоритме градиентного бустинга библиотеки CatBoost, даёт достоверный прогноз потребления электроэнергии, что является актуальным с точки зрения экономических выгод [9].

Математическая основа и применение CatBoost позволяют ему эффективно обрабатывать категориальные данные при построении точных прогностических моделей в различных областях.

Фундаментальные компоненты и математические принципы CatBoost включают комбинацию повышения градиента и обработки категориальных признаков:

1.  $L(y, F(x))$  – функция потерь, используемая в CatBoost. Эта функция представляет ошибку между истинной целью  $y$  и прогнозом модели  $F(x)$ .
2.  $F(x) = \sum_{m=1}^M f_m(x)$  – предсказание с помощью ансамблевой модели, где  $M$  – это количество деревьев  $b$  и  $f_m(x)$  представляет выходные данные каждого отдельного дерева.
3. Шаг градиентного спуска – на каждой итерации новое дерево подгоняется к отрицательному градиенту функции потерь для каждой выборки  $i$  в отношении текущего модельного прогноза:

$$r_{im} = -\frac{\partial L(y_i, F(x_i))}{\partial F(x_i)}. \quad (2)$$

### 1.3. Метод ансамбля градиентного бустинга деревьев решений XGBoost

XGBoost (Extreme Gradient Boosting) является улучшенным алгоритмом машинного обучения, который относится к семейству gradient boosting. XGBoost использует специально разработанную структуру и алгоритм повышения производительности, что определяет его эффективным с точки зрения вычислений. Метод имеет встроенный механизм для обработки пропущенных значений во время обучения. Алгоритм включает в себя методы регуляризации L1 и L2, контролирующие сложность модели для предотвращения переобучения. XGBoost позволяет определять свои собственные целевые функции и критерии оценки.

T. Chen в работе «XGBoost: A Scalable Tree Boosting System» проводит практическое исследование и приходит к заключению о том, что XGBoost – один из методов, который используется во многих сферах деятельности. Бустинг даёт самые современные результаты по многим стандартным критериям классификации. Инновации метода включают в себя: новый алгоритм древовидного обучения, предназначенный для обработки разреженных данных; теоретически обоснованную процедуру

создания эскиза взвешенных квантилей, которая позволяет обрабатывать веса экземпляров в приближенном древовидном обучении [10].

Надёжность XGBoost можно обосновать его эффективностью и способностью обрабатывать большие наборы данных, что применимо в различных сферах машинного обучения, включая задачи регрессии, классификации и ранжирования:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n L(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{K=1}^K \Omega(f_k), \quad (3)$$

где  $f(x)$  – целевая функция, которая сводится к минимуму;  $L(y_i, \hat{y}_i)$  – функция потерь, измеряющая погрешность между фактическими  $y_i$  и прогнозируемыми значениями  $\hat{y}_i$ ;  $\Omega(f_k)$  – член регуляризации, который определяет сложность отдельных деревьев, добавляя штраф за регуляризацию к весам дерева.

Модель прогнозирования методом XGBoost имеет следующий вид:

$$f(x) = \sum_{k=1}^k f_k(x_i). \quad (4)$$

На каждой итерации новые деревья подгоняются к отрицательному градиенту функции потерь:

$$r_{ik} = -\frac{\partial L(y_i, \hat{y}_i)}{\partial \hat{y}_i}, \quad (5)$$

где  $r_{ik}$  – отрицательный градиент функции потерь по отношению к текущему прогнозу.

#### 1.4. Метод прогнозирования на основе искусственной нейронной сети

Метод прогнозирования с использованием искусственной нейронной сети, особенно в последовательной модели, предполагает использование архитектуры глубокого обучения, предназначенной для обработки последовательных данных, таких как временные ряды, текстовые данные или любые данные с определённым порядком или последовательностью.

В работе авторов А.Н. Попова, А.Д. Венгерского «Разработка модели машинного обучения для прогнозирования генерации электроэнергии солнечными панелями на основе алгоритма градиентного бустинга» акцентируется внимание на том, что для предсказания солнечной радиации можно построить модель машинного обучения, но при этом подавляющее число используемых алгоритмов – нейронные сети [11].

В исследовании приводится архитектура ИНС, которая состоит из трёх слоев. Первый слой входной, он имеет 32 нейрона, на вход принимает 6 входных векторов; второй скрытый слой имеет 64 нейрона с функцией активации ReLU; третий – один выходной нейрон с линейной функцией активации. Оптимизатор для модели Adam, итераций обучения – 100, функцией потерь для задачи регрессии является среднеквадратичная ошибка (MSE) [12].

Процесс обучения включает в себя подачу последовательных данных в модель и обновление весов модели, чтобы минимизировать определённую функцию потерь. Нейронная сеть прямого действия (представленная в исследовании) выражается следующим образом:

1. Для одного нейрона (персептрона):

Ввод:  $x_1, x_2, \dots, x_n$

Вес:  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$

Смещение:  $b$

Функция активации  $\sigma(z) = \begin{cases} 0, & \text{если } z < 0 \\ z, & \text{если } z \geq 0 \end{cases}$ , таким образом  $\sigma(z) = \max(0, z)$ , т. е. если значение  $z$  больше или равно нулю, функция вернёт значение  $z$ , иначе она вернёт ноль. Это делает функцию ReLU простой и эффективной, она широко используется в нейронных сетях, поскольку обеспечивает быструю обучаемость и хорошую способность преодолевать проблему затухания градиента.

$$z = \omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \dots + \omega_n x_n + b; \quad (6)$$

2. Распространение через скрытый слой:

Для скрытого слоя с несколькими нейронами входные данные взвешиваются, суммируются и передаются через функцию активации:

$$z_j = \sum_{i=1}^n \omega_{ij} x_i + b_j \quad (7)$$

для каждого нейрона в слое,  $y_j = \sigma(z_j)$  для каждого нейрона, где  $z_j$  представляет собой взвешенную сумму плюс смещение для  $j$ -го нейрона, и  $\sigma(z_j)$  является выходным сигналом после прохождения функции активации для этого нейрона.

3. Распространение по последовательной модели:

В последовательной нейронной сети информация передаётся с помощью временных шагов. На временном шаге  $t$  входные данные  $x_t$  объединяются с предыдущим скрытым состоянием  $h_{t-1}$  и проходят через нейрон(ы).

$$h_{t-1} = \sigma(w_{hx} x_t + w_{hh} h_{t-1} + b_h), \quad (8)$$

где  $w_{hx}$  и  $w_{hh}$  – веса из входных данных и предыдущего скрытого состояния;  $b_h$  – это смещение;  $h_t$  – вывод или скрытое состояние в момент времени  $t$ , которое передаётся на следующий временной шаг.



## 2. Проведение исследования

Набор данных представлен в виде таблицы и содержит следующие значения с наименованиями:

*Date, time* – информация о временном промежутке, начиная с 15.05.2020 и заканчивая 18.06.2020, в виде 2020.05.15 00:00 (дд.мм.гггг чч:мм). Интервал времени – каждые 15 минут;

$P_{DC}$  – значение выработки постоянного тока, выраженное в кВт\*ч ;

$P_{AC}$  – значение выработки переменного тока, выраженное в кВт\*ч;

$T_A$  – температурное значение на солнечной станции, измеряемое в  $^{\circ}C$ ;

$T_M$  – значение показания модуля температуры, измеряемое в  $^{\circ}C$ ;

$I_r$  – электромагнитное и корпускулярное излучение Солнца, его количество за 15-минутный интервал времени, выраженный в кВт·ч/м<sup>2</sup>;

$H$  – время, час;

$D$  – день;

$D_W$  – день недели;

$M_{15}$  – 15-минутный отрезок времени в месяце.

Набор данных о выработке электроэнергии собирается на уровне инвертора – к каждому инвертору подключено несколько линий солнечных панелей. Данные датчиков собираются на уровне предприятия – единый массив датчиков оптимально размещён на предприятии (табл. 1) [13].

Таблица 1. Данные о выработке электроэнергии

<i>Date, time</i>	$P_{DC}$	$P_{AC}$	$T_A$	$T_M$	$I_r$	$H$	$D$	$D_W$	$M_{15}$
15.05.2020 00:00	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>25,2</b>	<b>22,9</b>	0	0	1	4	1
15.05.2020 00:15	0	0	25,1	22,8	0	0	1	4	2
15.05.2020 00:30	0	0	24,9	22,6	0	0	1	4	3
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
29.05.2020 09:00	6317,0	618,7	24,4	40,1	0,5	9	15	4	37
29.05.2020 09:15	8053,6	788,2	25,4	47,3	0,7	9	15	4	38
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
16.06.2020 23:15	0	0	22,9	21,3	0	23	33	1	94
16.06.2020 23:30	0	0	22,9	21,2	0	23	33	1	95
16.06.2020 23:45	0	0	22,892	21,2	0	23	33	1	96

На рис. 1 представлена корреляционная матрица зависимостей параметров набора данных, представленных в таблице.

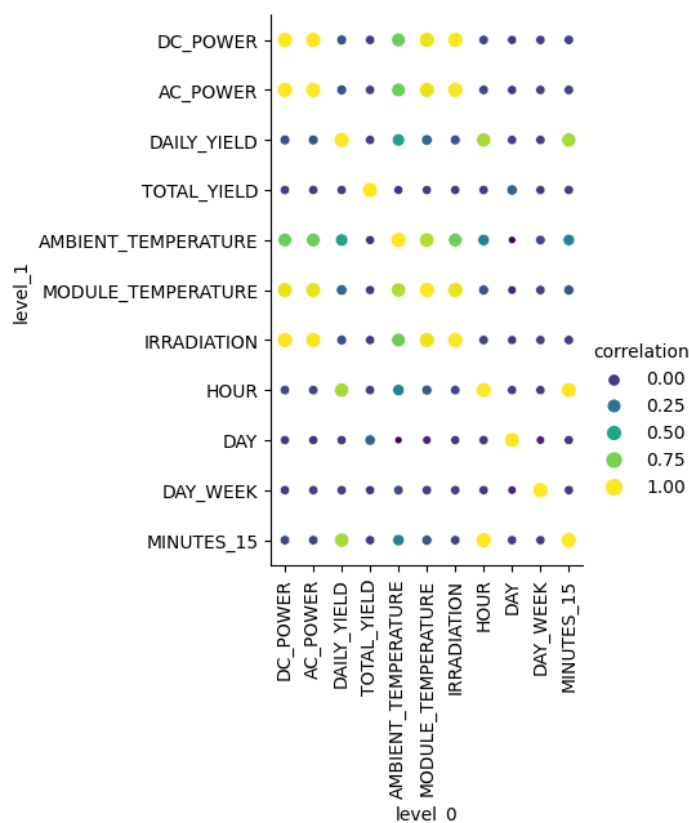


Рис. 1. Корреляционная матрица параметров набора данных

Корреляционная матрица представлена в виде графика, в котором коэффициент корреляции между всеми парами переменных отображается 5 уровнями коэффициента корреляции. Показано, насколько сильно и в каком направлении (положительном или отрицательном) связаны между собой переменные. Значения коэффициента корреляции варьируются от 1 до 0 (взяты по модулю), где 1 означает идеальную положительную, а 0 – отсутствие корреляции. На графике корреляционной матрицы видно, какие параметры имеют сильную корреляцию между собой (близкие к 1), какие – слабую (близкие к 0). Например, температура модуля и температура окружающей среды, уровень солнечного излучения имеют положительную корреляцию.

Проведено краткосрочное прогнозирование выработки мощности переменного (рис. 2) и постоянного тока (рис. 3) на сутки вперёд с использованием методов CatBoost, XGBoost, ИНС и линейной регрессии.

На рис. 2(а–г) отображены результаты прогнозирования мощности переменного тока солнечными панелями. Прогнозы выработки электроэнергии переменным током солнечными панелями с использованием различных методов были оценены на основе предоставленных параметров. Результаты показали различную прогностическую эффективность различных методов, CatBoost (рис. 2а) и XGBoost (рис. 2б) доказали относительно высокие прогностические способности, продемонстрировав многообещающую точность прогнозирования выходной мощности переменного тока. С другой стороны, метод линейной регрессии (рис. 2г) продемонстрировал наи-

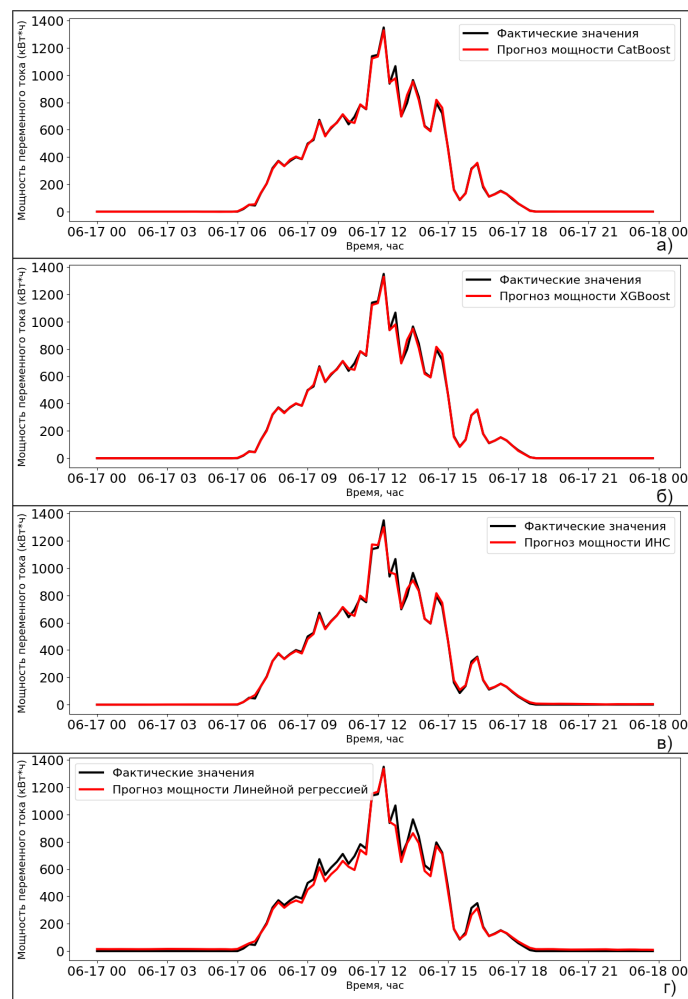


Рис. 2. Прогнозирование выработки мощности переменного тока методами: CatBoost (а); XGBoost (б); ИНС (в); линейной регрессии (г)

меньшую прогностическую способность среди представленных методов. Несмотря на свою простоту, он показал меньшую точность при отображении сложных взаимосвязей между входными параметрами и выходной мощностью переменного тока

На рис. 3(а–г) изображены графики прогноза выработки постоянного тока солнечными панелями. Так же, как и при прогнозировании выработки переменного тока, хуже себя проявил метод линейной регрессии (рис. 3г), а метод искусственных нейронных сетей (рис. 3в) занижил показатели во все пиковые временные периоды.

Проанализировав графики, можно утверждать, что методы CatBoost (рис. 3а) и XGBoost (рис. 3б) качественно прогнозируют оба показателя выработки мощностей и выдают приблизительно одинаково точные результаты.

Для оценивания качества эффективности представленных методов краткосрочного прогнозирования применялась метрика MAPE, которая характеризует отклонение в процентах от фактических значений (табл. 2).

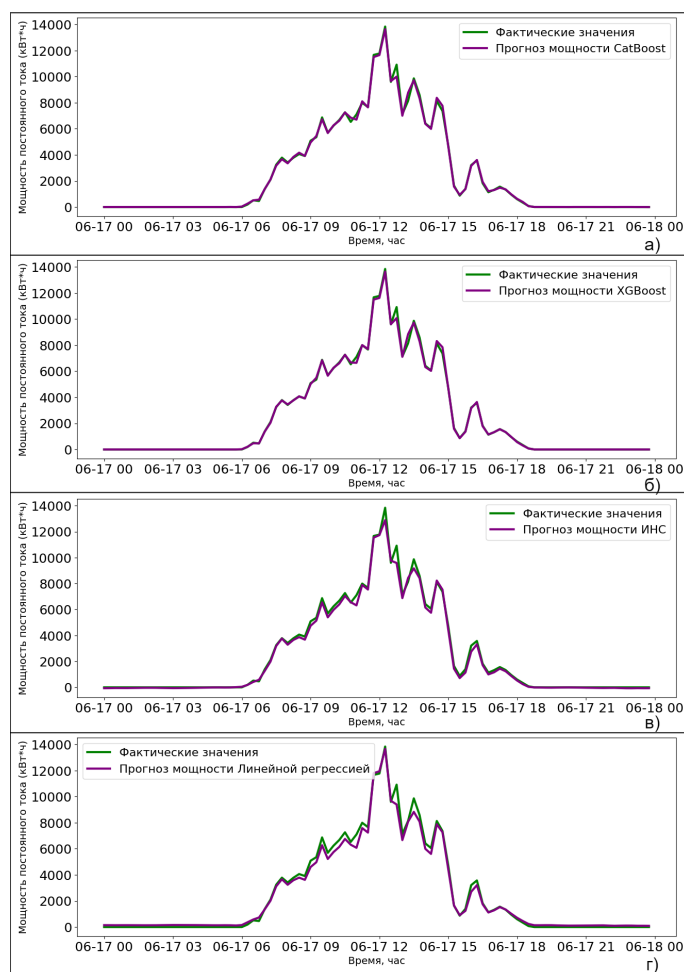


Рис. 3. Прогнозирование выработки мощности постоянного тока методами: CatBoost (а); XGBoost (б); ИНС (в); линейной регрессии (г)

В табл. 2 отображены средние значения абсолютной процентной ошибки (МАРЕ) для прогнозирования мощности переменного тока ( $P_{AC}$ ) и мощности постоянного тока ( $P_{DC}$ ).

При прогнозировании мощности  $P_{AC}$  XGBoost демонстрирует низкие значения  $MAPE = 2,44 \%$ , что указывает на высокий уровень точности прогнозирования мощности переменного тока. CatBoost показывает чуть более высокий показатель  $MAPE = 3,33 \%$  (соответствует требуемой точности). Метод на основе ИНС демонстрирует более высокий показатель  $MAPE = 7,09 \%$ , линейная регрессия имеет значение ошибки –  $14,01 \%$ , что демонстрируют графики прогнозов (см. рис. 2 и 3).

При прогнозировании мощности  $P_{DC}$  аналогичным образом, XGBoost обеспечивает низкий показатель  $MAPE = 2,22 \%$  для прогнозирования мощности постоянного тока, что подчёркивает его сильную прогностическую способность. CatBoost имеет  $MAPE = 4,04 \%$ , что также соответствует требуемой точности. Для метода на основе ИНС  $MAPE = 8,09 \%$ , также наблюдалось при прогнозировании мощности переменного тока, линейная регрессия показывает самый высокий показатель  $MAPE = 13,46 \%$ , что указывает на меньшую точность прогнозирования мощности

Таблица 2. Ошибка прогнозирования мощности переменного и постоянного тока

Значение метрики MAPE, %							
При прогнозировании $P_{AC}$				При прогнозировании $P_{DC}$			
<i>XGBoost</i>	<i>CatBoost</i>	ИНС	Линейная регрессия	<i>XGBoost</i>	<i>CatBoost</i>	ИНС	Линейная регрессия
2,44%	3,33%	7,09%	14,01%	2,22%	4,04%	8,09%	13,46%

постоянного тока, по сравнению с другими методами.

### 3. Выводы

Таким образом, рассмотрено растущее значение солнечной энергии в устойчивом производстве энергии и необходимость точного прогнозирования её выработки. В исследовании описаны различные методологии машинного обучения, включая линейную регрессию, *CatBoost*, *XGBoost* и искусственные нейронные сети, указывается их роль в повышении точности и надёжности прогнозов солнечной энергии.

По результатам установлено, что метод линейной регрессии неэффективен при прогнозировании солнечной энергии из-за сложностей установления взаимосвязей между входными данными и выходными.

Методы *CatBoost* и *XGBoost*, использующие деревья решений, продемонстрировали перспективные возможности прогнозирования. Они эффективно использовали сложность данных, что привело к высокой точности прогнозирования выходной мощности переменного тока, превосходящей традиционные методы. Искусственные нейронные сети, разработанные для обработки последовательных данных, продемонстрировали высокую точность в прогнозировании солнечной энергии. Однако расхождения в прогнозировании периодов пикового времени указывают на необходимость дальнейшего уточнения гиперпараметров модели.

### Литература

1. Глебов В.В., Братышев С.Н., Верига А.В. Краткосрочное прогнозирование выработки электроэнергии сетевой солнечной электростанции методом рекуррентных нейронных сетей // Цифровые технологии и защита информации в современном обществе : сборник докладов Международной научно-практической конференции (Астрахань, 29–30 ноября 2021 г.). Астрахань : Астраханский государственный университет, 2021. С. 4–9.
2. Горшенин А.Ю. Формирование выборки исходных данных для машинного обучения модели краткосрочного прогнозирования электропотребления // Автоматизация в промышленности. 2023. № 10. С. 37–41. DOI: 10.25728/avtprom.2023.10.08.
3. Эвок Д.А., Дьячков Я.А., Микулицкий М.В. Прогнозирование температур поверхности солнечных панелей по стандартам NOCT и NMOT // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере : материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, учёных. Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2023. С. 76–79.

4. Горшенин А.Ю., Денисова Л.А. Прогнозирование выработки электроэнергии ветроэлектростанцией с применением рекуррентной нейронной сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 4. С. 39–45. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-39-45.
5. Тюньков Д.А., Сапилова А.А., Грицай А.С., Алексеенко Д.А., Хамитов Р.Н. Методы краткосрочного прогнозирования выработки электрической энергии солнечными электростанциями и их классификация // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 3 (48). С. 4–10. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-3(48)-4-10.
6. Горшенин А.Ю., Васина Д.И. Сравнение используемых методов при прогнозировании выработки электроэнергии ветроэлектростанциями // Математические структуры и моделирование. 2023. № 3 (67). С. 36–42. DOI: 10.24147/2222-8772.2023.3.36-42.
7. Корнеев В.П., Хрисанфова К.С. Применение полиномиальных признаков в задачах линейной регрессии // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 94–5. С. 154–156. DOI: 10.18411/trnio-02-2023-275.
8. Бойко Т.А. Разработка алгоритма построения модели множественной линейной регрессии // Экономика и управление: проблемы, решения. 2018. Т. 8, № 12. С. 113–119.
9. Моргоева А.Д., Моргоев И.Д., Ключев Р.В., Гаврина О.А. Прогнозирование потребления электрической энергии промышленным предприятием с помощью методов машинного обучения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 7. С. 115–125. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3527.
10. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining – KDD’16. 2016. P. 785–794. DOI: 10.1145/2939672.2939785.
11. Попов А.Н., Венгерский А.Д. Разработка модели машинного обучения для прогнозирования генерации электроэнергии солнечными панелями на основе алгоритма градиентного бустинга // Интеллектуальная энергетика : сборник научных статей кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» АлтГТУ им. И.И. Ползунова / сост.: С.О. Хомутов, В.И. Сташко. Барнаул : Межрегиональный центр электронных образовательных ресурсов, 2021. С. 101–103.
12. Саетова Л.Г., Горохов М.М. Нейронная сеть и регрессия: описание линейной регрессии в нейронных сетях // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сборник трудов научно-технической конференции в рамках Всероссийского молодежного научного форума «Общение студентов и аспирантов в научной и профессиональной сферах» (Ижевск, 26 мая 2021 г.). Ижевск : Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, 2021. С. 15–21.
13. Васина Д.И. Описание программы для проведения анализа выработки мощности постоянного и переменного токов солнечной электростанции // Актуальные вопросы энергетики : материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Омск, 25–26 мая 2023 г.) / редколлегия: П.А. Батраков (отв. ред.) [и др.]. Омск : Омский государственный технический университет, 2023. С. 133–137.

## **REVIEW AND APPROBATION OF MACHINE LEARNING METHODS FOR SHORT-TERM FORECASTING**

**D.I. Vasina**

Master's Degree Student, e-mail: bacina94@mail.ru

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

**Abstract.** The article defines the growing importance of solar energy in sustainable energy production. Traditional forecasting models had difficulty coping with complex nonlinear patterns, but the advent of machine learning methods has significantly increased accuracy and reliability in this area. The article discusses various machine learning techniques used to predict solar energy: linear regression, CatBoost, XGBoost, artificial neural networks. The paper explains the mathematical principles underlying the presented methods, such as loss functions, ensemble models, gradient descent stages, regularization terms and specific functional forms of these machine learning methodologies. The role of machine learning methods in significantly improving the accuracy and reliability of solar energy forecasts is emphasized.

**Keywords:** output forecasting, machine learning, decision trees, linear regression, artificial neural networks.

*Дата поступления в редакцию: 14.05.2023*

## ПРОЦЕССНАЯ СЕМАНТИКА КОМПЛЕКСНЫХ ЧИСЕЛ

**И.А. Суров**

канд. физ.-мат. наук, доцент, старший научный сотрудник, e-mail: ilya.a.surov@itmo.ru

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** Ряд перспективных подходов к имитации естественного мышления строится с привлечением волновых и квантово-подобных моделей, позволяющих преодолеть ограничения булевой логики и классической теории вероятностей. Дальнейшее развитие этих направлений требует выявления причин, обуславливающих эти преимущества. В данной статье показано, что такой причиной является соответствие фундаментальных принципов естественного мышления алгебре комплексных чисел. В частности, установлено, что векторная структура этих чисел совпадает с универсальной когнитивной моделью процессов в природе. При этом различные фазы комплексного числа соответствуют этапам жизненного цикла соответствующей деятельности. В четырёхэтапной модели этапы «новость», «цель», «действие» и «результат» соответствуют фазам рассматриваемого процесса в обычном понимании этого выражения. При этом действительная и мнимая оси комплексной плоскости описывают фактическое и ожидаемое состояние результата процесса. Простота и универсальность представленной модели позволяют ей избежать ряда острых проблем современных подходов к формализации предсказательного кодирования когнитивной информации. Эти свойства открывают возможности для алгоритмической имитации процессного мышления и построения природоподобных вычислительных систем.

**Ключевые слова:** комплексные числа, семантика, процесс, предсказательное кодирование, прогнозное моделирование.

### 1. Введение

Современные вычислительные системы преуспели в задачах распознавания, оптимизации, аппроксимации данных, композиции текстов и других тиражируемых задачах, для которых доступны большие массивы обучающих данных. Смысловой (семантический, когнитивный [1]) поиск и аналитика данных, напротив, поддаются алгоритмизации намного труднее и в настоящее время остаются прерогативой человека [2]. В условиях информационного взрыва, однако, скорости естественного мышления для решения этих задач оказывается недостаточно. Их частичная автоматизация является одним из важнейших элементов следующего техноуклада, строящегося вокруг когнитивно-семиотических технологий [3–5].

Для решения этой проблемы разрабатываются способы обработки информации на оптических, голографических и квантовых принципах, позволяющие имитиро-



вать особенности естественной памяти, восприятия, смыслообразования, рассуждения и принятия решений [6–8], не находящие выражения в нейросетевой парадигме. Эти разнородные подходы, однако, в основном используют трудновосприимчивые математические средства, что препятствует их развитию и взаимообогащению. Для решения этой проблемы желательно найти «общую точку» оптических, голографических и квантово-подобных алгоритмов обработки информации, позволившую бы совместить и развить отмеченные преимущества.

Искомая общность легко обнаруживается в соответствующих разделах физики, успешно применяемых для анализа информационных процессов [9]. Модели оптических и голографических вычислений описываются на основе физики электромагнитных волн, характерной явлениями интерференции и суперпозиции, а также ограниченной определённости наблюдаемых величин; то же самое верно для квантовой теории, первоначально известной как «волновая механика» [10, 11]. Математическим выражением этой общности является формализация соответствующих процессов с помощью комплексных чисел. Как в квантовой, так и в классической физике волн от них можно уйти ценой (иногда намного) более громоздкой действительной формы; краткость и простота выкладок именно в комплексной записи, тем не менее, указывают на глубинное соответствие комплексных чисел устройству природы.

Возможности использования комплексных чисел в алгоритмах искусственного интеллекта, однако, практически не изучены. Отмеченные подходы обходят этот вопрос стороной, обычно используя такие числа формально, что снижает теоретическую ценность и интерпретируемость получаемых моделей. Представленная в этой статье интерпретация комплексных чисел направлена на решение этой проблемы. В разделе 2 приведены основы комплекснозначного исчисления и рассмотрен его простейший физический прототип. В разделе 3 представлена структурная модель процесса, далее совмещённая со структурой комплексных чисел в разделе 4. В разделе 5 свойства представленной модели рассмотрены применительно к задаче прогнозного когнитивно-поведенческого моделирования.

## 2. Структура комплексных чисел и колебательный процесс

Любое комплексное число  $z = x + iy$  представляется в виде

$$z = Re^{i\phi}, \quad e^{i\phi} = \cos \phi + i \sin \phi, \quad (1)$$

где  $R \geq 0$  и  $0 \leq \phi \leq 2\pi$  есть амплитуда и фаза комплексного числа, как показано на рис. 1. При этом согласно свойствам тригонометрических функций  $e^{i\phi} = e^{i(\phi+2\pi)}$ , вследствие чего число (1) не меняется при изменении фазы на  $2\pi$  радиан (360 градусов). Таким образом, в отличие от амплитуды с линейным порядком значений, угловая координата  $\phi$  имеет круговую структуру.

Для интерпретации выражения (1) можно рассмотреть любую из множества задач, в которых комплексные числа возникают естественным образом. Простейшей среди них является задача о свободном гармоническом маятнике. В этой задаче инертное тело движется под действием упругой силы, пропорциональной его сме-

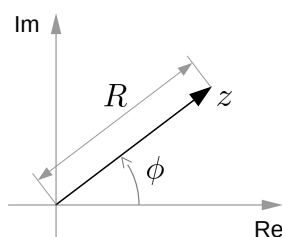


Рис. 1. Комплексная плоскость, образованная действительной (Re) и мнимой (Im) осями. Амплитуда и фаза комплексного числа (1) соответствуют длине и направлению вектора на этой плоскости

щению по оси  $X$ . Уравнение Ньютона такого движения имеет вид

$$\frac{d^2}{dt^2}x(t) + \omega^2x(t) = 0, \tag{2}$$

где  $\omega^2$  есть отношение жёсткости упругой силы к инерции системы. Решением этого уравнения является гармоническое колебание

$$x(t) = A \cos(\omega t + \phi_0) \tag{3}$$

с амплитудой  $A$ , частотой  $\omega$  и начальной фазой  $\phi_0$ , определение которых из начальных условий завершает решение задачи.

На практике параметры функции (3) обычно априори неизвестны. Напрямую измеряются лишь положения тел в отдельные моменты времени. Знание таких положений в один любой момент, однако, данные параметры найти не позволяет. Для этого координаты тел обычно дополняют информацией об их скорости  $v(t)$ , после чего знание пары величин  $(x, v)$  для каждого тела позволяет сделать прогноз их будущих координат (например, планет Солнечной системы) на основании законов механики.

В ходе гармонического колебания (3) скорость тела равна производной от этой функции по времени

$$v(t) = \frac{d}{dt}x(t) = -A\omega \sin(\omega t + \phi_0). \tag{4}$$

При этом движение маятника представляется на (фазовой) плоскости  $XV$  равномерным движением по круговой траектории, как показано на рис. 2б.

Комплексные числа используются для более компактного описания этого движения. При этом действительная координата  $x$  в уравнении (2) заменяется на комплексное число (1). Решением уравнения (2) тогда становится экспоненциальная функция с мнимым аргументом

$$z(t) = Ae^{i(\omega t + \phi_0)}, \quad x(t) = \text{Re}[z(t)], \tag{5}$$

где параметры  $A$ ,  $\omega$  и  $\phi_0$  сохраняют свои функции, тогда как исходное решение (3) равно действительной части (5) согласно тождеству Эйлера (1). При этом для нахождения скорости необязательно вводить новую тригонометрическую функцию,

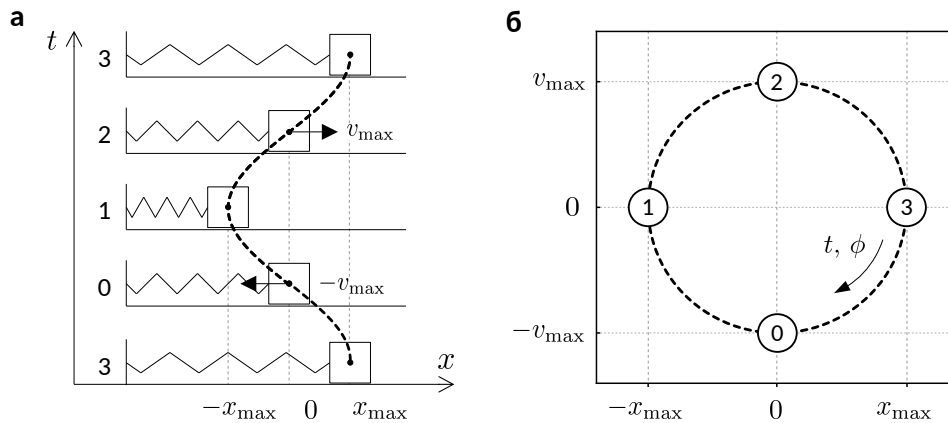


Рис. 2. (а) последовательные состояния пружинного маятника в ходе свободного гармонического колебания (3); (б) траектория гармонического колебания на фазовой плоскости координата-скорость согласно уравнениям (3) и (4) при нулевой начальной фазе  $\phi_0$

как это делается в обычном решении (4). В комплекснозначном случае взятие производной от функции (5) соответствует её домножению на мнимую константу  $i\omega$ , так что скорость движения

$$v(t) = \operatorname{Re}[i\omega * z(t)] = \omega * \operatorname{Im}[z(t)] \quad (6)$$

пропорциональна мнимой части комплексной координаты (5). Соответственно, траектория маятника на фазовой плоскости XV (рис. 2б) с точностью до растяжения вертикальной оси эквивалентна вращению вектора (5) на комплексной плоскости, показанной на рис. 1.

Таким образом переход к комплекснозначному описанию, во-первых, удобен математически: отсутствие необходимости иметь дело с двумя типами функций, т. е. синусом и косинусом в уравнениях (3) и (4), на практике значительно упрощает вычисления. Физику колебаний и волн тем не менее можно сформулировать и в рамках действительных чисел. Более важно то, что комплекснозначная математика полнее отражает сущность описываемых явлений, как видно на вышеприведённом примере. Это свойство ещё более значимо в квантовой механике, которая изначально формализуется посредством алгебры векторов и операторов в комплекснозначных (Гильбертовых) пространствах [12]. В этом случае комплекснозначное исчисление необходимо для описания не только физических, но и мыслительно-поведенческих процессов [7, 13], что и обуславливает интерес к её когнитивной интерпретации.

### 3. Функциональная структура процесса

Несмотря на то, что искомая интерпретация комплексных чисел относится к работе естественного мышления, казалось бы, далёкой от задач механики, её основные черты можно установить на примере пружинного маятника, показанного на рис. 2.

### 3.1. Семантика колебательного процесса

При нулевой начальной фазе  $\phi_0 = 0$  в начальный момент времени  $t = 0$  (точка 3 на рис. 2) определяемый координатой груза (3) размер маятника принимает наибольшее значение с растяжением  $x(0) = A$ . Этот исходный размер уменьшается по гармоническому закону (2), согласно которому пружина стремится к нерастянутому состоянию  $x = 0$  (точка 0,  $\phi = \pi/2$ ), когда сила упругости равна нулю. Пружина, взятая отдельно, осталась бы в этом равновесном положении, однако разогнанный груз продолжает сжимать её в силу своей инерции. При этом пружина занимает пассивную роль, принимая внешний импульс и накапливая его в виде внутренней (потенциальной) энергии.

Импульс груза исчерпывается ( $v = 0$ ) в крайней точке 1 на рис. 2, соответствующей фазе  $\phi = \pi$ . При этом размер системы достигает наименьшего значения при отрицательном растяжении  $x = -A$ . В этот момент наибольшего напряжения пружина переходит из режима приёма в режим отдачи, направляя накопленную энергию для расширения системы путём выталкивания груза. Этот этап продолжается вплоть до точки 2 на фазе  $\phi = 3\pi/2$ , в которой пружина вернулась в недеформированное состояние  $x = 0$  и её внутренняя энергия перешла в энергию движения груза. Подобно противоположной точке 0, это равновесное положение преодолевается благодаря инерции груза, проходящего теперь уже в положительном направлении с наибольшей скоростью  $v = v_{\max}$ . Этот этап продолжается вплоть до остановки груза  $v = 0$ , когда энергия его движения целиком затрачена на расширение системы до наибольшего размера  $x = A$ . В этот момент маятник попадает в исходное состояние 3, завершая цикл колебательного движения.

### 3.2. Универсальная структура процесса

Для нахождения искомой функции это описание необходимо освободить от частностей рассматриваемой механической задачи. Оставшееся содержание представляет собой следующий набор этапов, соответствующих нумерации состояний на рис. 2:

- Этап 0: движение внутрь, сжатие системы, накопление потенциала;
- Этап 1: наименьший размер системы, наибольшее напряжение, переход от сжатия к расширению;
- Этап 2: движение наружу, расширение системы, выделение энергии;
- Этап 3: наибольший размер системы, наименьшее напряжение, переход от расширения к сжатию.

В таком абстрактном виде эта последовательность образует общую структуру процессов, известную как *жизненный цикл* систем различной природы: живых организмов, организаций и социально-экономических систем, проектов, товаров и технологий [14]. Установлено её соответствие с функциями времён года и суток, когда этапы  $0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$  соответствуют зиме (ночи), весне (утру), лету (дню)

и осени (вечеру). Эта последовательность представляет собой универсальную логику развития процессов в природе, с необходимостью отражённую в естественно-процессном мышлении [15]. Четырём этапам процесса при этом соответствуют следующие когнитивно-поведенческие функции, отмеченные на рис. 3:

- Этап 0: накопление опыта, восприятие новой информации;
- Этап 1: анализ проблем, постановка целей и планирование будущего;
- Этап 2: действия по осуществлению плана, проведение мероприятий и работ;
- Этап 3: апробация и оценка полученного результата, внедрение в практику.

Эта динамика соответствует кибернетическому циклу управления, в котором субъект (слева, 1) взаимодействует с объектом (справа, 3) посредством прямых (2) и обратных (4) потоков информации (там же). Принципиальную важность при этом имеет цикличность модели, отражающая диалектическое замыкание процесса: в отличие от линейных моделей, в циклической структуре результат направлен не просто куда-то в будущее, а отвечает на возникшую проблему [16].



Рис. 3. Функциональная структура четырёхэтапной модели процесса

Горизонтальная (X) и вертикальная (Y) оси на рис. 3 кодируют размер системы и направленность его динамики в ходе процесса; в семантике Ч. Осгуда [17] эти оси соответствуют ортогональным факторам *силы* и *активности* [15]. Это соответствие отличает представленную модель от схематических изображений жизненных циклов, лишённых количественного выражения. Как и в механической задаче (раздел 2), (фазовая) траектория процесса располагается на фазовой, или *процессной, плоскости*, образованной метрологически обеспеченными величинами. Это свойство представленной структуры вводит процессное моделирование в научное поле [15, 16].

### 3.3. Пример

Рассмотрим описанную структуру на примере процесса стройки дома.

- На этапе 0 происходит нормальная эксплуатация имеющегося жилья, в ходе которой, однако, со временем накапливаются неудобства и напряжения. Когда комплекс этих напряжений и неудобств осознаётся как проблема, требующая решения, например, плохое состояние имеющегося жилья или его несоответствие изменившимся нуждам, процесс переходит в следующую фазу.
- На этапе 1 выявленная проблема – отсутствие удобного жилья – обдумывается. Выявляются её причины и вырабатывается желаемый образ будущего жилья. Разрабатывается план по достижению этой цели (ремонт имеющегося или строительство нового дома), рассчитываются необходимые средства, заключаются договоры и составляются планы и сметы.
- На этапе 2 проводятся намеченные мероприятия, осуществляются запланированные и незапланированные действия по достижению поставленной цели: сбор ресурсов, подготовка участка, подведение коммуникаций, строительные работы, отделка и т. д. Также решаются непредвиденные проблемы и трудности. Это этап наибольшей внешней активности.
- На этапе 3 проводятся проверки, оценка и доведение полученного результата до финального состояния. Дом вводится в эксплуатацию, происходит его внедрение в процессы жизнедеятельности. Последующая эксплуатация соответствует возврату процесса к описанному выше этапу 0.

### 3.4. Прогнозная функция

Знание текущего сезона позволяет предвидеть динамику природной среды, а также связанной с ней деятельности человека. Такое предвидение возможно благодаря знанию структуры сезонного цикла, соответствующей строению процесса на рис. 3 (зима внизу и далее по часовой стрелке). Аналогично знание структуры любого процесса и его текущей фазы делает возможным прогнозирование будущего течения этого процесса.

Как видно из примера о стройке дома, название процесса обычно указывает на его целевой результат – объект, сущность, фактор или событие, на которое направлен процесс. По отношению к этому результату (содержание точки 3 в схеме на рис. 3) этапы процесса несут следующую прогнозную информацию:

- На этапе 3 результат только что достигнут и имеется в наличии. Это состояние можно обозначить как состояние «результат есть». Далее ожидается его обкатка и внедрение в практику.
- На этапе 0 идёт нормальная деятельность на основе только что полученного результата. В отсутствие новых целей (относительно жилья) и соответствующих действий нового результата (нового дома) при этом не ожидается.

- На этапе 1 осознанная проблема обусловлена отсутствием результата. Это состояние «результата нет». В этом состоянии ожидаются действия по решению проблемы.
- На этапе 2 проводимые мероприятия ведут к результату на следующем шаге. Это состояние «результат ожидается», после которого ожидается состояние 3 «результат есть».

Таким образом четырёхэтапная структура процесса

Новость → Цель → Действие → Результат

соответствует последовательности прогнозных состояний

Не ожидается → Нет → Ожидается → Есть.

На практике, разумеется, процесс разворачивается непрерывно как показано на рис. 3. При этом указанные состояния позволяют ориентироваться в этой непрерывности подобно тому, как этапы проектирования, реализации и рефлексии [18] позволяют ориентироваться в жизненном цикле проекта и прогнозировать его течение несмотря на то, что хронологические границы между этими этапами могут быть определены нечётко.

#### 4. Процессная интерпретация комплексных чисел

Независимо от числа этапов ключевым свойством представленной модели процесса является замкнутая кольцевая структура. Для своей математической кодировки эта структура требует соответствующей числовой системы. Простейший вариант такой системы представляют собой именно комплексные числа благодаря кольцевой топологии их фазового параметра, отмеченной в разделе 2. В соответствии со структурой комплексной плоскости (рис. 1) для такого кодирования наиболее удобна описанная в разделе 3 четырёхэтапная модель процесса<sup>1</sup>. Таким образом, искомая интерпретация комплексных чисел определяется наложением модели процесса (рис. 3) на комплексную плоскость (рис. 1). При этом состояние процесса описывается комплексным числом (1), фаза которого соответствует *фазе процесса* в обычном смысле этого выражения. При обычном измерении угла  $\phi$  против часовой стрелки точки 0, 1, 2 и 3 соответствуют значениям  $3\pi/2 = 270^\circ$ ,  $\pi = 180^\circ$ ,  $\pi/2 = 90^\circ$  и 0, так что квадранты комплексной плоскости соответствуют переходам между соседними точками на рис. 4. Согласно тождеству

$$Re^{i\phi} * e^{i\Delta} = Re^{i(\phi+\Delta)}$$

каждый из этих переходов соответствуют домножению комплексного числа (1) на постоянный множитель  $e^{i(-\pi/2)} = -i$ , поворачивающий вектор на рис. 1 на  $90^\circ$  по часовой стрелке.

<sup>1</sup>Разбиение процессного цикла на отдельные этапы является вопросом удобства в конкретной задаче. Наиболее распространено использование от трёх до шести этапов [14, 15].

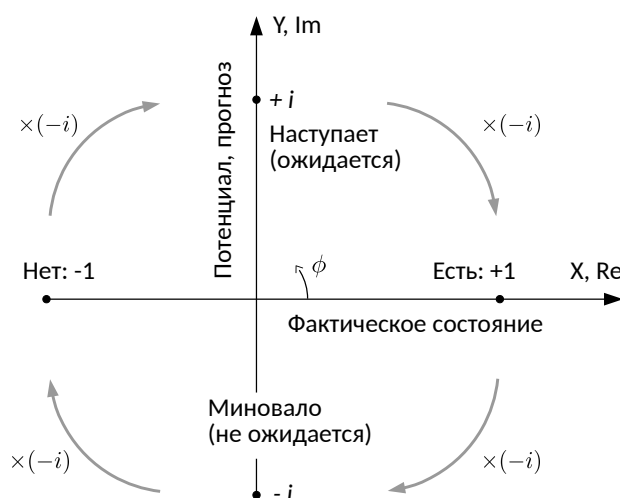


Рис. 4. Процессная интерпретация комплексной плоскости. Серыми стрелками показано направление процессного цикла в согласии с рис. 2 и 3

Согласно прогнозной функции этапов процесса (раздел 3.4) декартовы оси комплексной плоскости получают следующие функции. Горизонтальная, действительная ось  $X$  описывает действительное, т. е. фактическое состояние результата, на который направлен процесс (дом в процессе стройки, пример в разделе 3.3). В крайней левой точке цикла  $\phi = \pi$ ,  $z = -1$  отсутствие этого результата соответствует состоянию «нет». В крайней правой точке цикла  $\phi = 0$ ,  $z = 1$  наличие этого результата соответствует состоянию «есть». Для колебательного процесса на рис. 2 таким результатом является достижение маятником максимального размера.

Вертикальная, мнимая ось  $Y$  описывает мнимое, т. е. потенциальное, возможное состояние результата. В крайней верхней точке  $\phi = \pi/2$ ,  $z = i$  в силу проводимых для этого мероприятий результат *ожидается*. В крайней нижней точке  $\phi = 3\pi/2$ ,  $z = -i$ , напротив, результат уже достигнут на предыдущей фазе процесса и более *не ожидается*. Ожидается, напротив, событие «нет» в точке  $z = -1$ . Абсолютные значения этих координат, следовательно, и модуль соответствующего вектора (1) определяются единицами измерения по осям  $X$  и  $Y$ .

## 5. Использование в когнитивном моделировании

Представленная интерпретация комплексных чисел указывает на их тесную связь с принципами естественного мышления, важнейшей функцией которого является прогнозирование будущего [19, 20]. Такой прогноз (предчувствование, предвидение), будь то завтрашняя погода, загруженность дороги, реакция партнёра на новый проект или собственное самочувствие, необходим психике для управления поведением организма [21]. Для такого управления важно знать последствия событий, а не их описание как таковых; в этой связи представление информации в естественном мышлении имеет не пассивный, отвлечённо-описательный, а активный, конкретно-предсказательный характер [22, 23].



### 5.1. Предсказательное кодирование

Именно такую конкретно-предсказательную функцию выполняет описанное выше комплекснозначное представление. Расположение события в процессной структуре ничего не говорит о его содержании самом по себе, но явно указывает на его причины и следствия, расположенные назад и вперёд по ходу процесса. Эта причинно-следственная функция любого информационного блока *в составе конкретного процесса* кодируется фазовым параметром, как показано на рис. 3 и 4.

Такой способ кодировки позволяет решить ряд проблем, свойственных современным подходам к предсказательному кодированию психической информации на основе сетевых структур, например, так называемых байесовских сетей, строящихся для представления логико-вероятностных связей элементов поведенческой ситуации весами рёбер соответствующего графа [24–26]. Недостатком такого подхода<sup>2</sup> является неопределённость принципов построения сетевой структуры, свойственной для информации различной модальности (зрительная, слуховая и т. д.) и различных типов когнитивно-поведенческой активности. Кроме того, параметры таких сетей интерпретируются не лучше параметров других нейросетевых моделей, что дополнительно ограничивает практическое применение методов этого типа.

Представленная структура, напротив, единообразно описывает пространственно-временные и абстрактно-мыслительные процессы независимо от модальности информационных блоков в их составе; простота этой структуры, свойственная глубинным архетипам психики, обеспечивает её интуитивную интерпретируемость [15]. Предложенное кодирование процессно-прогностической информации комплексными числами наследует эту интерпретируемость, универсальность и простоту. Сложность и гибкость, характерные для естественной психики, при этом достигаются многоуровневым наложением многих процессов, в которых участвует субъект мышления. Таким образом, комплексное число представляет собой естественную и универсальную единицу информации для задач выявления и анализа процессов в данных различной природы [29–32].

### 5.2. Биологический носитель

Естественным носителем представленной модели является колебательная динамика нейронных ансамблей в нервной системе живых организмов [33–37]. Участвующие в этой динамике электрохимические колебания и волны описываются подобно механическому колебанию, рассмотренному в разделе 2. Фаза представляемого процесса при этом кодируется фазой соответствующего колебания или волны [38–41], порождая так называемую волновую логику вероятностных когнитивно-поведенческих закономерностей [28].

Таким образом, мышление живых организмов работает как аналоговый динамический симулятор окружающей среды, процессы которой представляются волновыми возбуждениями соответствующей нервной системы. Эффективность симуляции при этом обусловлена точностью такого представления в сегменте природы, зна-

<sup>2</sup>Помимо ограниченной применимости логики множеств, классической теории вероятности и байесовского вывода для моделирования естественного мышления [27, 28].

чимом для деятельности организма [42]. Возможность такого соответствия обеспечена структурным изоморфизмом (иерархически организованных [43]) колебательных процессов в окружающей среде организма и его когнитивной системе.

Важнейшую роль в этом соответствии играют фазовые параметры комплексных чисел, кодирующие текущее состояние рассматриваемых процессов. Верная оценка фазовых параметров необходима для своевременности принимаемых решений: всему своё время; готовь сани летом и т. д. Ошибка в таких параметрах («сдвиг по фазе») проявляется в неадекватном мышлении и несвоевременных поступках, ведущих к ущербу соответствующей деятельности. В этой связи фазовая синхронизация является одним из главных биологических механизмов естественного мышления [34, 37, 44, 45].

## 6. Заключение

Представленная интерпретация комплексных чисел применима к голографическим, квантово-подобным и другим моделям мышления и принятия решений на основе волновой логики [28]. В последнем случае комплексные величины также кодируют амплитуду и фазу квантово-когнитивных состояний. Предполагается, что соответствующая алгебра комплексных чисел может стать важной частью информационных систем следующего поколения на принципах естественного мышления [46]. Процессная логика комплексных чисел отражает важнейший такой принцип, лежащий в основе субъективно-смыслового и причинно-следственного мышления живых организмов [15].

Помимо интерпретации существующих, представленная модель полезна для создания новых алгоритмов обработки и представления данных, в том числе на основе комплекснозначных нейросетей [47]. В связке с имеющимися моделями когнитивной семантики и семиотики [27] этот подход позволяет сориентировать поиск в наиболее эффективном природоподобном направлении. Такое сопряжение открывает возможности для создания интерпретируемых и информационных систем и вычислительных архитектур на новых логико-математических принципах.

## 7. Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-71-01046 (<https://rscf.ru/project/23-71-01046/>).

## Литература

1. Максимов Н.В., Голицына О.Л. От семантического к когнитивному информационному поиску. Основные положения и модели глубинного семантического поиска // Научно-техническая информация. Серия 2. Информационные процессы и системы. 2022. № 6. С. 1–16.
2. Hagendorff T., Wezel K. 15 challenges for AI: or what AI (currently) can't do // AI Soc. 2020. Vol. 35, No. 2. С. 355–365.

3. Хорошевский В.Ф. Семантические Технологии: Ожидания и тренды // Ostis-2012. 2012. С. 10–12.
4. Колмаков В.Ю. Семантические технологии – основа нового технологического уклада. 2017. URL: <http://www.radnews.ru/сРхРёРер,,СЪРчСЪРхСФРэРчРх-СЪРхСЖР,,Р«РЪР«РҮРчРч-Р«СФР,,Р«РӱРө-Р,,Р«Рӱ/?ysclid=lmhk9ufq8y663916390> (дата обращения: 29.10.2023).
5. Moore D.T. [et al.] Sensemaking for 21st century intelligence // J. Intell. Hist. 2021. Vol. 20, No. 1. С. 45–59.
6. Кузнецов О.П. Голографические модели обработки информации в нейронных сетях // Докл. РАН. 1992. Т. 324, № 3. С. 537–540.
7. Khrennikov A. Yu. Ubiquitous Quantum Structure. From psychology to finance. Heidelberg : Springer, 2010. 216 p.
8. Райков А.Н. Слабый vs сильный искусственный интеллект // Информатизация и связь. 2020. № 1. С. 81–88.
9. Максимов Н.В., Лебедев А.А. О природе и определениях информации: физика и семантика // Научно-Техническая Информация. Серия 2. Информационные Процессы и системы. 2020. № 7. С. 1–12.
10. van der Waerden B.L. From Matrix Mechanics and Wave Mechanics to Unified Quantum Mechanics // Phys. Concept. Nat. 1973. С. 276–293.
11. Smith W.F. Waves and Oscillations A Prelude to Quantum Mechanics. Oxford University Press, 2010.
12. Холево А.С. Математические основы квантовой информатики. Лекционные курсы НОЦ. М : МИАН, 2018. 118 с.
13. Суров И.А., Алоджанц А.П. Модели принятия решений в квантовой когнитивистике. Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2018. 63 с. URL: <http://books.ifmo.ru/book/2187/> (дата обращения: 29.10.2023).
14. Берг Д.Б., Ульянова Е.А., Добряк П.В. Модели жизненного цикла : учебное пособие. Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2014. 74 с.
15. Суров И.А. Жизненный цикл: смысловая матрица процессного моделирования // Онтология проектирования. 2022. Т. 12, № 4. С. 430–453.
16. Суров И.А. Процессная онтология и квантование информации // Знания – Онтологии – Теории. Новосибирск, 2023.
17. Osgood C.E. Studies on the generality of affective meaning systems // Am. Psychol. 1962. Vol. 17, No. 1. С. 10–28.
18. Белов М.В., Новиков Д.А. Основы теории комплексной деятельности. Ч. 2. Жизненные циклы комплексной деятельности. Организация и управление как комплексная деятельность // Проблемы управления. 2018. № 4. С. 39–48.
19. Pally R. The predicting brain: Unconscious repetition, conscious reflection and therapeutic change // Int. J. Psychoanal. 2007. Vol. 88, No. 4. С. 861–881.
20. Bubic A., Yves von Cramon D., Schubotz R.I. Prediction, cognition and the brain // Front. Hum. Neurosci. 2010. Vol. 4.
21. Gładziejewski P. Predictive coding and representationalism // Synthese. 2016. Vol. 193, No. 2. С. 559–582.
22. Clark A. Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science // Behav. Brain Sci. 2013. Vol. 36, No. 3. С. 181–204.
23. Clark A. Perceiving as Predicting // Perception and Its Modalities / edited by Stokes D.,

- Matthen M., Biggs S. Oxford University Press, 2014. P. 23–43.
24. Gopnik A., Glymour C. Causal maps and Bayes nets: a cognitive and computational account of theory-formation // *The Cognitive Basis of Science*. Cambridge University Press, 2002. С. 117–132.
  25. Williams D. Predictive coding and thought // *Synthese*. Springer Netherlands. 2020. Vol. 197, No. 4. P. 1749–1775.
  26. Millidge B., Seth A., Buckley C.L. Predictive Coding: a Theoretical and Experimental Review. 2021. P. 1–56.
  27. Суров И.А. Какая разница? Прагматическая формализация смысла // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2023. № 1. С. 78–89.
  28. Суров И.А. Логика множеств и логика волн в когнитивно-поведенческом моделировании // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2024 (в печати).
  29. van der Aalst W. *Data Science in Action // Process Mining*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2016. P. 3–23.
  30. Adamo G. [et al.]. *Business Process Management Forum / edited by Weske M. [and etc.]*. Cham : Springer, 2018. Vol. 329.
  31. Andryushin A. [and etc.] *Outlier Detection in Predictive Analytics for Energy Equipment // Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling*. Studies in Systems, Decision and Control, vol 259 / Edited by Kravets A., Bolshakov A., Shcherbakov M. Cham : Springer, 2020. С. 193–203.
  32. Surov I.A. *Process-Semantic Analysis of Words and Texts // Artificial Intelligence in Models, Methods and Applications / edited by Dolinina O. [and etc.]*. Cham : Springer, 2023. P. 247–260.
  33. Hutcheon B., Yarom Y. Resonance, oscillation and the intrinsic frequency preferences of neurons // *Trends Neurosci*. 2000. Vol. 23, No. 5. P. 216–222.
  34. Glass L. Synchronization and rhythmic processes in physiology // *Nature*. 2001. Vol. 410, No. 6825. P. 277–284.
  35. VanRullen R., Dubois J. The Psychophysics of Brain Rhythms // *Front. Psychol*. 2011. No. 2. P. 1–10.
  36. Arnal L.H., Giraud A.L. Cortical oscillations and sensory predictions // *Trends Cogn. Sci*. 2012. Vol. 16, No. 7. P. 390–398.
  37. Fries P. Rhythms for Cognition: Communication through Coherence // *Neuron*. 2015. Vol. 88, No. 1. P. 220–235.
  38. Niebur E., Koch C., Rosin C. An oscillation-based model for the neuronal basis of attention // *Vision Res*. 1993. Vol. 33, No. 18. P. 2789–2802.
  39. Tiesinga P.H., Sejnowski T.J. Mechanisms for phase shifting in cortical networks and their role in communication through coherence // *Front. Hum. Neurosci*. 2010. Vol. 4. P. 1–14.
  40. Neuling T. [and etc.] Good vibrations: Oscillatory phase shapes perception // *Neuroimage*. 2012. Vol. 63, No. 2. P. 771–778.
  41. Ten Oever S. и др. Phase-Coded Oscillatory Ordering Promotes the Separation of Closely Matched Representations to Optimize Perceptual Discrimination // *iScience*. 2020. Vol. 23, No. 7. P. 101282.
  42. Barsalou L.W. Simulation, situated conceptualization, and prediction // *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci*. 2009. Vol. 364, No. 1521. P. 1281–1289.
  43. Markov N.T., Kennedy H. The importance of being hierarchical // *Curr. Opin. Neurobiol*. 2013.

- Vol. 23, No. 2. P. 187–194.
44. Varela F. и др. The brainweb: Phase synchronization and large-scale integration // Nat. Rev. Neurosci. 2001. Vol. 2, No. 4. P. 229–239.
  45. Wright J.J., Bourke P.D. The growth of cognition: Free energy minimization and the embryogenesis of cortical computation // Phys. Life Rev. 2021. Vol. 36. P. 83–99.
  46. Widdows D., Kitto K., Cohen T. Quantum Mathematics in Artificial Intelligence // J. Artif. Intell. Res. 2021. Vol. 72. P. 1307–1341.
  47. Complex-Valued Neural Networks. Theories and Applications / edited by Hirose A. World Scientific, 2003.

### **PROCESS SEMANTICS OF COMPLEX NUMBERS**

**I.A. Surov**

Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor, Senior Scientist Researcher,  
e-mail: ilya.a.surov@itmo.ru

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

**Abstract.** Perspective approaches to imitation of natural thinking build on wave- and quantum-like models, overcoming the limitations of Boolean logic and classical probability calculus. Further development of these methods requires an explanation of the reasons for these advantages. This paper shows that such a reason is the affinity of fundamental principles of natural cognition to the algebra of complex numbers. The vector structure of these numbers, in particular, matches the universal cognitive model of processes in nature. First, different phases of the complex number correspond to the phases "novelty", "goal", "action", and "result" of the life cycle of the considered activity. Real and imaginary axes of the complex plane then describe the factual and potential dimensions of the process's result. Simplicity and universality allow this model to avoid the major difficulties of modern approaches to predictive coding of cognitive information. These features open ways to algorithmic imitation of process thinking and the development of nature-like computational systems.

**Keywords:** complex numbers, semantics, process, predictive coding, prognostic modeling.

*Дата поступления в редакцию: 03.11.2023*

## **ИСТОРИЧЕСКАЯ ИММОРТАЛИЗАЦИЯ: ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ДОЛГОСРОЧНОГО ХРАНЕНИЯ ИСТОРИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

**Т.Е. Болдовская**<sup>1,3</sup>

канд. техн. наук, доцент, e-mail: boldovskaya73@gmail.com

**В.И. Гресь**<sup>2,3</sup>

лаборант, e-mail: gresvladimir02@gmail.com

**А.Е. Ветров**<sup>2,3</sup>

лаборант, e-mail: aleksandrvetrov838@gmail.com

<sup>1</sup>Омский государственный технический университет, Омск, Россия

<sup>2</sup>Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

<sup>3</sup>Томский государственный университет, Томск, Россия

**Аннотация.** Изучаются вопросы долгосрочной сохранности цифровых исторических данных и обеспечения их безопасности в цифровом мире. Проанализированы современные методы архивации электронных данных и сделан вывод о целесообразности использования микросервисной архитектуры с репликацией хранилищ.

**Ключевые слова:** архивация, сохранение цифровых исторических данных, контейнеризация, репликация хранилищ.

### **Введение**

С каждым днем наш мир становится всё более цифровым, сохранение исторических данных не является исключением.

Сохранение цифровых исторических данных важно для сохранения памяти и наследия наших предков. Такие данные включают в себя различные материалы: документы, фотографии, записи и другие ценные артефакты, которые помогают нам понять формирование нашего мира и общества.

Однако с ростом объёма цифровых данных и изменением технологий, сохранение этих данных становится сложной задачей. Без правильных методов и стратегий существует риск потери важных свидетельств прошлого.

Помимо этого, сохранение цифровых исторических данных также требует доступности для будущих поколений. Главная задача не только сохранить эти данные, но и создать возможность для последующих поколений ознакомиться с ними. Вследствие этого вопрос о методах сохранения цифровых исторических данных остаётся актуальным в связи с сохранением нашей хронологии и культурного наследия, обеспечением безопасности данных в цифровом мире и связью прошлого с будущим.

## **1. Основные положения в архивации цифровых исторических данных**

### **1.1. Определение**

Рабочая группа, сформированная в 2007 г. Американской библиотечной ассоциацией, определила понятие электронного архивирования как сохранение цифровых данных, сочетающее в себе политику, стратегии и действия, направленные на обеспечение доступа к переформатированному и рождённому цифровому контенту независимо от проблем, связанных с провалами средств массовой информации и технологическими изменениями. Целью цифрового сохранения является точное воспроизведение аутентифицированного контента с течением времени [1].

### **1.2. Основные принципы долгосрочного хранения данных**

В первую очередь архивация цифровых исторических данных нужна для долговременного хранения (от 100 лет) и защиты информации. Также немаловажной особенностью является то, что данные должны быть свободны от необоснованного ограничения и доступны населению, даже в том случае если финансирование проекта было прекращено [2, 3]. Эта концепция позволяет восстановить эти данные даже спустя долгие годы и без большого труда воспользоваться ими в научных целях.

### **1.3. Виды цифровых объектов**

Важно понимать какие объекты придётся сохранять, от этого будет зависеть стратегия их архивации.

Исследователи выявляют несколько видов цифровых объектов, подлежащих сохранению [4]:

- Оцифрованные версии документов;
- Цифровые материалы, для которых отсутствует аналог в печатной форме;
- Индивидуальные объекты, такие как тексты, изображения и аудиозаписи;
- Коллективные ресурсы, такие как веб-сайты, электронные журналы;
- Наборы данных, состоящие из различных научных, компьютерных и других материалов;
- Метаданные, облегчающие долгосрочное хранение файлов и извлечение необходимой информации, включая данные о формате файла, используемом программном обеспечении и истории изменений.

### **1.4. Метаданные**

Метаданным отводят существенное значение в организации коллекций, содержащих аудио-, видео- и рукописные материалы, которые может быть сложно идентифицировать без сопровождающих текстовых описаний.

Международный стандарт «PROMISE» определяет метаданные как информацию, которую пользователь хранилища использует для поддержки процесса сохранения цифровых данных [5].

## 2. Методы архивации электронных данных

Проблемы с хранением возникают из-за двух факторов; во-первых, электронные носители документов, как правило, менее надёжны, чем бумажные, и со временем быстрее изнашиваются; во-вторых, быстрые темпы технического прогресса приводят к регулярному обновлению систем кодирования информации, типов носителей (таких как жёсткие диски, твердотельные накопители, флэш-накопители), устройств и программного обеспечения. Следовательно, старые технологии устаревают и перестают быть частью повседневного использования. Простого сохранения носителя недостаточно для сохранения электронного документа в течение долгого времени. С течением времени информация становится нечитаемой либо из-за износа носителя, либо из-за устаревания технологии обработки. Следовательно, пассивное сохранение носителя оказывается бесполезным. Оттого становится крайне важным принимать меры путём постоянного мониторинга безопасности электронных документов, проведения анализа рисков и заблаговременного переноса документов в новые форматы носителей с возможным преобразованием. Другая потенциальная проблема возникает, когда речь заходит о поддержании согласованности в процессе пересмотра, обновления или замены информационных форматов по мере развития технологий. Каждый тип информации, такой как тексты, изображения и видео, часто требует правил преобразования. Однако новые программы и устройства, как правило, не поддерживают устаревшие форматы. Для точного считывания, интерпретации и проверки подлинности документа крайне важно сохранить не только его содержание, но и метаданные, описывающие его характеристики и жизненный цикл, включая архивное хранение.

### 2.1. Консервация

Сохранение цифровых данных предполагает работу с материалами в их форматах и на носителях с использованием оригинальной технологии или ранее использовавшегося аппаратного и программного обеспечения. Такой подход приводит к созданию «компьютерного музея», где материалы представлены и поддерживаются в их форматах с их функциональными возможностями. Хотя консервация считается стратегией архивирования, она может быть хорошим вариантом для определённых цифровых данных, поскольку позволяет сохранить исходные инструменты доступа (программное обеспечение). Однако при реализации этой стратегии могут возникнуть проблемы с обслуживанием и затратами, связанными с обеспечением постоянной доступности определённых типов файлов. Более того, консервация также ограничивает переносимость ресурсов, поскольку зависит от оборудования, хранящегося в определённых местах [6].



## **2.2. Эмуляция**

Эмуляция относится к процессу репликации операционной системы с целью обеспечения совместимости с форматами данных. Включает в себя создание виртуальной машины на компьютере, которая способна имитировать функции аппаратной и программной среды. В некотором смысле эмуляция похожа на стратегии консервации, поскольку она предполагает сохранение целостности прикладной программы. Отличие в том, что основная цель эмуляции – сохранить как внешний вид, так и функциональность объекта путём дублирования его технического содержания, что позволяет в будущем использовать либо исходный объект, либо его обновлённую версию.

## **2.3. Инкапсуляция**

Хранение описания документа внутри объекта вместе с самим документом, известное как инкапсуляция, влечёт за собой включение описания документа в цифровом формате. Это снижает зависимость от внешних факторов, поскольку позволяет либо воспроизвести среду, либо перенести документ в новую, используя эту информацию.

## **3. Проектирование системы для иммортализации исторических данных**

В рамках проекта «РНФ № 23-78-10119» одной из задач является создание научно обоснованной аналитической модели исторического информационного ресурса «Православный ландшафт таёжной Сибири: акторы, институты, сети», включающей выявление зависимостей между социальными, культурными и природными факторами формирования поселенческой сети методами математической статистики, которая подразумевает создание информационной системы. В ней, в свою очередь, будет храниться множество исторических данных.

Возникает вопрос долговременного хранения этих данных, чтобы даже после завершения выполнения проекта данными мог воспользоваться любой желающий.

Преимуществом является создание системы с полного нуля. Это даёт возможность изначально проектировать его с возможностью к расширению, поддержанию и сохранению данных в будущем.

### **3.1. Архитектура платформы**

Первоначально архитектура системы планировалась таким образом, чтобы в дальнейшем не возникало трудностей внедрения новых сотрудников или передачи её третьим лицам для поддержания или совершенствования.

За основу взят подход микросервисной архитектуры. Такой подход, в отличие от стандартного «RESTful API», имеет много преимуществ. Микросервисы могут быть легко добавлены, удалены или изменены без влияния на остальную систему. Это важное свойство в проекте, потому что разработка будет проходить совместно

с несколькими группами разработчиков из разных городов. Такая гибкость позволит качественнее делегировать обязанности между группами. Каждый микросервис может быть разработан, протестирован и развернут независимо от других. Благодаря этому, как было ранее сказано, можно значительно упростить работу и в начале проекта, и после его завершения, благодаря другим людям. Так как в дальнейшем предполагается интеграция со сторонними сервисами для улучшения качества технологичной среды для исторических исследований, микросервисы позволят не привязываться к определённому языку или технологии, что даст возможность даже спустя долгие годы продолжить разработку системы.

Проект предполагает использование из всех частей Российской Федерации независимо от часового пояса. Это, в свою очередь, требует высокой доступности. Для её обеспечения все микросервисы оборачиваются в специальные кластеры, которые можно множить и оркестрировать по отдельным сервисам в случае их отказа.

### 3.2. Длительное сохранение данных

Для каждого документа ведётся сбор и сохранение метаданных, чтобы гарантировать, что они могут быть воспроизведены и проиндексированы поисковыми системами в будущем.

На рисунке 1 представлен пример метаданных для работы «Толкование на Апокалипсис», созданных в Национальном исследовательском Томском государственном университете, на базе которого реализуется данный проект.

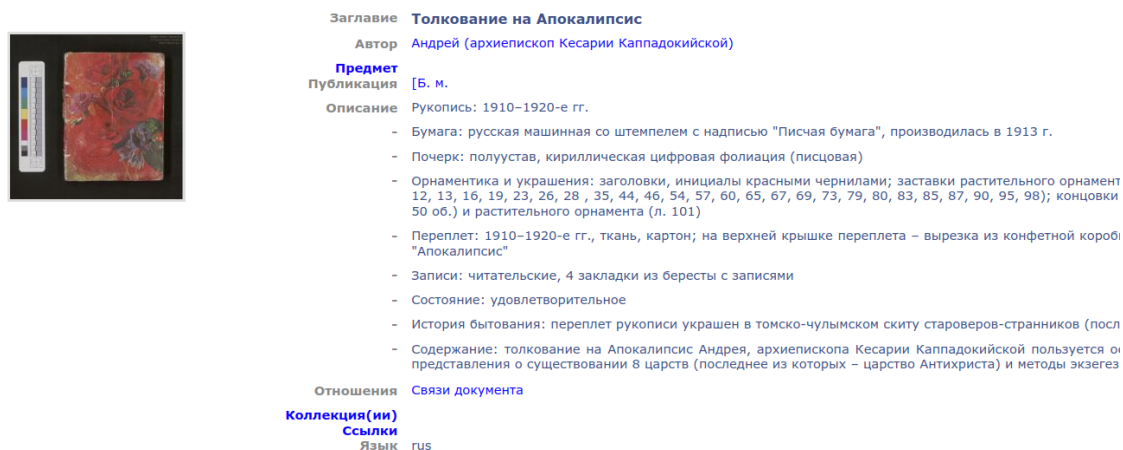


Рис. 1. Пример метаданных для работы «Толкование на Апокалипсис»

Также вся информация о документах будет храниться внутри самой системы в базе данных, что удовлетворяет требованию инкапсуляции.

### 3.3. Контейнеризация

Вместо того, чтобы полагаться на операционную систему, установленную на главном компьютере, контейнеры «Docker» содержат свою минимальную операци-

онную систему, специально разработанную для запуска приложения. Эта *автономная* среда включает свою файловую систему, процессы и ресурсы. Все необходимые библиотеки, зависимости и исполняемые файлы, которые необходимы для правильной работы приложения, также включены в контейнер, что устраняет любые конфликты между версиями и гарантирует работу приложения в контролируемой и предсказуемой среде.

Контейнер уже содержит всё необходимое для бесперебойной работы приложения. Сюда входят версии библиотек, настройки среды выполнения и другие компоненты. В результате воспроизведение среды выполнения в другой системе становится простым.

Docker использует файлы конфигурации, такие как Dockerfile, чтобы указать, как создавать и запускать контейнер. Они предлагают декларативный подход для определения зависимостей и настроек, упрощающий процесс воспроизведения среды при одновременном повышении надёжности.

Благодаря этому подходу реализуется сразу два принципа: консервация и эмуляция.

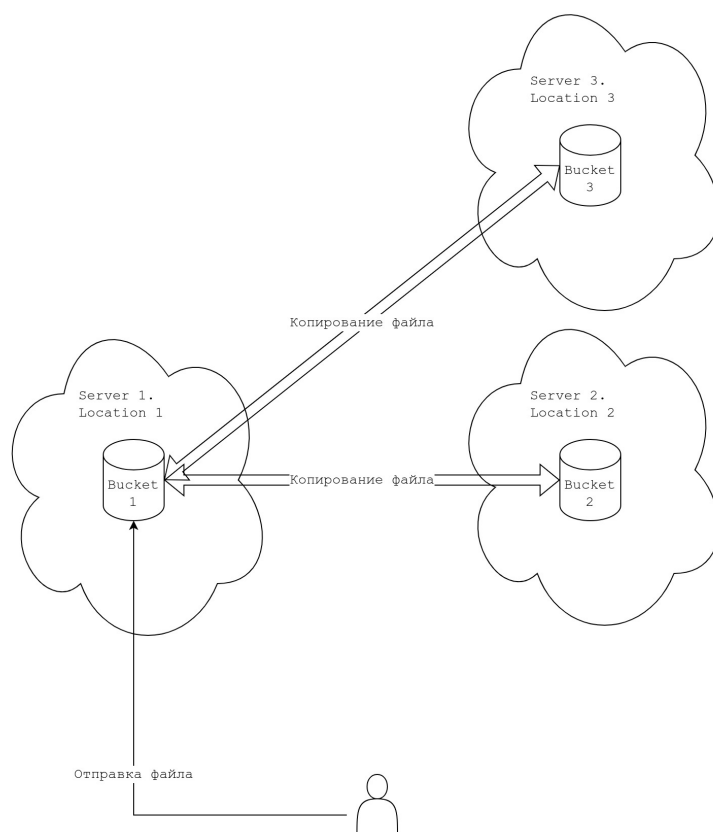


Рис. 2. Пример загрузки файла и его последующее копирование в другие хранилища

### 3.4. Репликация хранилищ

Репликация данных через хранилища данных позволяет создавать резервные копии в разных местах (см. рис. 2). В случае, если один из узлов или серверов, хранящих данные, становится недоступным, например, из-за неисправности или технического обслуживания, пользователи и система по-прежнему могут получать доступ к данным из реплик. Это повышает надёжность систем и к тому же уменьшает влияние сбоев на доступность данных.

Более того, репликация данных служит средством обеспечения целостности и безопасности. В случае, если одна реплика скомпрометирована из-за атак или случайной потери данных, другие реплики могут сохранять копии. Это повышает уровень безопасности данных и обеспечивает восстановление после негативных инцидентов без ущерба для важной информации.

Как и остальная инфраструктура в системе, хранилища будут помещены в контейнер, и на них будут располагаться правила, описанные в предыдущей секции.

## 4. Заключение

Исходя из проведённого исследования существующих правил и систем долгосрочного архивирования исторических данных, для разрабатываемого проекта перспективнее всего будет использование микросервисной архитектуры и контейнеризации системы, а также использование репликаций хранилищ, что, несомненно, скажется на доступности и сохранности исторических данных.

## 5. Благодарности

Данная работа была выполнена при поддержке гранта № 23-78-10119, выделенного Российским научным фондом.

## Литература

1. Martyniak C. Definitions of Digital Preservation // American Library Association. 2007. Vol. 4.
2. ООН. Хартия о сохранении цифрового наследия. 2003. URL: [https://www.un.org/ru/documents/decl\\_conv/conventions/digital\\_heritage\\_charter.shtml](https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/digital_heritage_charter.shtml) (дата обращения: 10.01.2010).
3. Digital Preservation at UW–Madison // University of Wisconsin–Madison Libraries. 2019.
4. Hazarika R. Digital Preservation in Academics Libraries // International Journal of Library and Information Studies. 2020. No. 10. P. 6.
5. Pringle A. The Role of Metadata in Digital Preservation // Library and Information Science Graduate Student Posters. 2018. P. 2.
6. The State of the Art and Practice in Digital Preservation // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. 2002.
7. Толкование на Апокалипсис / Андрей Кесарийский. [Б. м.], 1910–1920 гг. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000204036> (дата обращения: 10.01.2010).

## HISTORICAL IMMORTALISATION: EFFICIENT METHODS FOR LONG-TERM STORAGE OF HISTORICAL DATA

**T.E. Boldovskaya**<sup>1,2</sup>

Ph.D. (Techn.), Associate Professor, e-mail: boldovskaya73@gmail.com

**V.I. Gres**<sup>2,3</sup>

Laboratory Assistant, e-mail: gresvladimir02@gmail.com

**A.E. Vetrov**<sup>2,3</sup>

Laboratory Assistant, e-mail: aleksandrvetrov838@gmail.com

<sup>1</sup>Omsk State Technical University, Omsk, Russia

<sup>2</sup>Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>3</sup>Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia

**Abstract.** The article is devoted to the study of the issues of long-term preservation of digital historical data and ensuring their security in the digital world. Modern methods of archiving electronic data are analyzed and a conclusion is made about the expediency of using a microservice architecture with storage replication.

**Keywords:** archiving, preservation of digital historical data, containerization, storage replication.

*Дата поступления в редакцию: 25.11.2023*

## МОДЕЛЬ РАСПОЗНАВАНИЯ ПОЛА ДИКТОРА НА ОСНОВЕ АУДИОДАНЫХ

**А.Т. Мухаматханова**

студент, e-mail: mukhamatkhanovaalsu@gmail.com

**Т.М. Опарина**

старший преподаватель, e-mail: oparina2007@yandex.ru

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

**Аннотация.** Рассматривается задача распознавания пола диктора по аудиоданным с использованием метода *k*-ближайших соседей (KNN). Авторы предлагают алгоритм извлечения признаков из спектрограмм аудиозаписей, основанный на вычислении центроида, ширины спектра и спада высоких частот. Затем полученные признаки используются в качестве входных данных для метода KNN. Результаты показывают, что предложенный метод позволяет достичь высокой точности распознавания пола диктора.

**Ключевые слова:** машинное обучение, анализ аудиоданных.

### Введение

В современном мире разработка систем идентификации пола диктора становится все более актуальной. Такие системы находят широкое применение в различных областях, включая криминалистику и колл-центры. Данная работа представляет собой исследование и реализацию алгоритма машинного обучения, предназначенного для автоматического распознавания мужского и женского голосов на основе анализа аудиоданных. Для реализации алгоритма будет использоваться язык программирования Python, а также специализированные библиотеки, такие как Scikit-Learn, Pandas, NumPy, Matplotlib и другие. Любые аудиоданные можно представить как функцию от амплитуды и времени. Для понимания машиной аудиоданных они должны быть представлены в виде числовых данных. Для этого необходимо из аудиоданных извлечь акустические характеристики. Будем использовать библиотеку Librosa – пакет Python для анализа звука [1, 2]. В качестве источника данных для обучения и тестирования алгоритма будет использоваться датасет аудиоданных «Common Voice».

### 1. Работа с набором данных. Анализ данных

Для начала проанализируем данные датасета. Используем метод `read_csv()` для чтения данных и функцию `head()` для вывода. Датасет содержит 8 колонок с данными (см. рис. 1).

```
data=pd.read_csv('common-voice/cv-valid-train.csv')
data.head(5)
```

	filename	text	up_votes	down_votes	age	gender	accent	duration
0	cv-valid-train/sample-000000.mp3	learn to recognize omens and follow them the o...	1	0	NaN	NaN	NaN	NaN
1	cv-valid-train/sample-000001.mp3	everything in the universe evolved he said	1	0	NaN	NaN	NaN	NaN
2	cv-valid-train/sample-000002.mp3	you came so that you could learn about your dr...	1	0	NaN	NaN	NaN	NaN
3	cv-valid-train/sample-000003.mp3	so now i fear nothing because it was those ome...	1	0	NaN	NaN	NaN	NaN
4	cv-valid-train/sample-000004.mp3	if you start your emails with greetings let me...	3	2	NaN	NaN	NaN	NaN

Рис. 1. Содержимое датасета

Исходный датасет включает много пустых данных и данные, не нужные для распознавания мужского и женского голоса. Однако данные датасета являются реалистичными, включая различные аудиодорожки с людьми из разных частей мира и с определённым акцентом. Для решения задачи будет достаточно только самого аудиофайла и пола человека, который произносит текст в нём. Из датасета мы выбираем только два столбца – «filename» и «gender». С помощью функции `notna()` проверяем данные на наличие пустых значений и формируем новый датасет (см. рис. 2).

```
data = data[['filename', 'gender']]
new_data = data[data['gender'].notna()]
new_data.reset_index(inplace=True, drop=True)
new_data.head()
```

	filename	gender
0	cv-valid-train/sample-000005.mp3	female
1	cv-valid-train/sample-000008.mp3	male
2	cv-valid-train/sample-000013.mp3	female
3	cv-valid-train/sample-000014.mp3	male
4	cv-valid-train/sample-000019.mp3	male

Рис. 2. Датасет после удаления ненужных данных

Значение столбца «gender» важно для классификации. Для распознавания нужно, чтобы классификация была бинарная, следовательно, значений в этом столбце должно быть два – «мужчина» и «женщина». Но в столбце «gender», помимо двух значений, которые необходимы, присутствует ещё и третье значение. Это данные, в которых люди, произносящие текст, решили не оглашать свой пол. Следующим шагом необходимо удалить данные, у которых значение столбца «gender» равняется «other». Проведя анализ данных и преобразования, получили датасет, который содержит в себе только необходимые данные для поставленной задачи.

## 2. Извлечение признаков из аудиодорожек

Извлечение признаков является важным этапом в аудиоанализе. Отберём признаки, которые являются ключевыми в определении пола человека. Для этого используем функции, с помощью которых будем извлекать данные признаки [3]:

1. `feature_spectral_centroid` – функция для определения спектрального центроида. Указывает, на какой частоте сосредоточена энергия спектра или, другими словами, где расположен «центр масс» для звука;
2. `feature_spectral_bandwidth` – функция для определения спектральной ширины;
3. `feature_spectral_rolloff` – функция для определения спектрального спада. Это мера формы сигнала, представляющая собой частоту, в которой высокие частоты снижаются до 0;
4. `feature_mfcc_mean` – мел-кепстральные коэффициенты. Представляют собой набор признаков, которые описывают общую форму спектральной огибающей. Они моделируют характеристики человеческого голоса.

Датасет с извлечёнными данными содержит в себе 23 столбца с числовыми данными, которые являются важными для обучения, и один столбец с названием пола (см. рис. 3). Данные являются числовыми, они уже понятны для машины, но имеют очень большие значения и отклонения. Для дальнейшей работы и правильной классификации их нужно привести к стандартному виду.

	gender	1	2	3	4	5	6	7	8	9 ...	14	15	16
19787	0	2676.649813	2665.705767	5318.154351	-531.11615	106.982056	-1.045521	28.467484	10.845261	4.290282 ...	0.313017	-4.977850	-6.315069
19788	1	2814.714591	3405.077399	5438.105194	-548.00793	104.883804	53.127365	34.703370	12.573208	22.028343 ...	4.388365	-4.981477	2.755410
19789	0	2408.574034	2368.667478	4312.204817	-432.23120	138.888120	13.700328	32.105200	-1.449688	9.888707 ...	0.639174	-8.937414	-0.169536
19790	0	1885.397634	1950.331935	3298.793039	-606.87350	129.088350	22.133833	23.852484	14.771211	-2.254710 ...	-5.886711	-11.928243	-0.183971
19791	0	3071.184919	3171.170628	6326.787961	-424.43845	124.160520	-11.763888	23.819141	1.263500	8.397840 ...	-8.623758	-14.255218	-0.836812

5 rows x 24 columns

Рис. 3. Датасет с извлеченными данными

## 3. Подготовка данных к обучению

Следующим этапом необходимо подготовить данные к обучению. Для этого делаем следующие шаги:

1. Разделяем данные на два вектора. Вектор «Y» – целевой вектор. Он содержит в себе значения, которые нужно предугадать, т. е. значение столбца «gender». А вектор «X» – вектор признаков, содержит в себе все остальные данные, которые важны для обучения.  
 $Y = df\_features.gender.values$   
 $X = df\_features.drop(["gender"], axis=1).$



2. Стандартизация данных. Стандартизация – процесс преобразования исходного набора данных в новый со средним значением – 0 и стандартным отклонением – 1. Стандартизация позволяет устранить возможное влияние отклонений по какому-либо признаку. Признаки датасета часто имеют большие различия в своих диапазонах, поэтому стандартизация необходима. А в алгоритмах, которые вычисляют расстояние между точками на графике, отсутствие стандартизации может привести к неправильному восприятию данных. Стандартизацию будем выполнять с помощью функции `StandardScaler()`.
3. Разделение данных. Разделение данных на обучающую и тестовую выборки необходимо для оценки способности модели к обобщению на новых данных, которых не было в обучающей выборке. Если модель будет обучена на данных из обучающей выборки и затем протестирована на тех же данных, она может показать высокую точность предсказаний, но при этом плохо справиться с новыми данными. Обучать модель будем на данных «X\_train» и «Y\_train», а делать прогнозы и проверять качество модели – на «X\_test» и «Y\_test». Разделение проводится с помощью функции `train_test_split` из библиотеки `Scikit-learn`. Для обучения возьмём 80 % данных, а для тестирования – 20 %.

#### **4. Метод k-ближайших соседей (KNN)**

При реализации данного алгоритма используются следующие методы:

1. Метод `init` – это функция инициализации переменных;
2. Метод `fit` – функция, которая сохраняет тренировочный набор данных;
3. Метод `predict` – функция предсказания меток класса;
4. Метод `find_labels` – функция расчёта расстояния по каждому тестовому наблюдению для каждого наблюдения из тренировочного набора;
5. Метод `distance` – функция расчёта расстояния. Для расчёта расстояния используем Евклидово расстояние [4]:

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2}.$$

6. Метод «`most_common`» – функция определения наиболее частого класса;
7. Метод «`score`» – функция для определения точности алгоритма;
8. Для алгоритма очень важно правильно подобрать параметр «k» – число соседей. Значения «k» от 2 до 10 с шагом 1. Далее на графике можно отследить точность алгоритма в зависимости от значения «k» (см. рис. 4). На графике видно, что наивысшая точность достигается при  $k = 2$  и постепенно уменьшается с увеличением этого параметра.

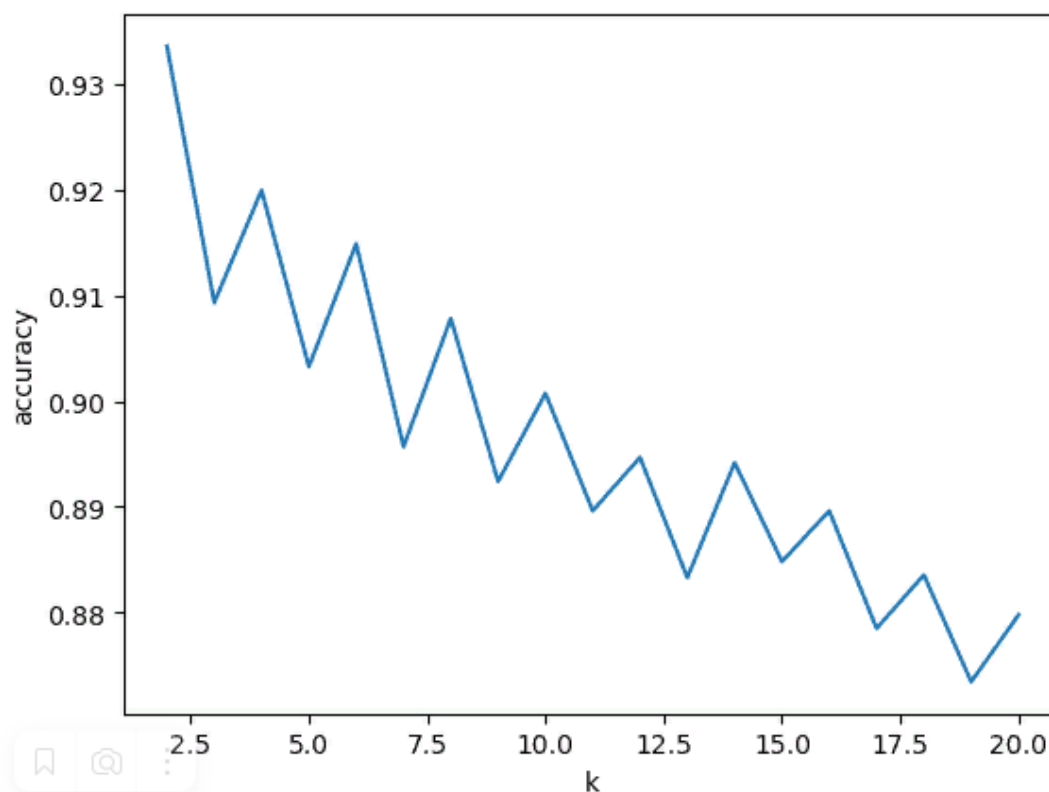


Рис. 4. График зависимости точности алгоритма от параметра k

## 5. Анализ результатов

Точность алгоритма составила 88 %. Из 1004 мужчин алгоритм предугадал 990, а ошибся только на 14, а при предугадывании женщин он сделал 219 ошибок. Таким образом, алгоритм лучше распознает мужчин, чем женщин, такая проблема может возникнуть при несбалансированности данных. В нашем датасете много данных, но количество мужчин сильно превосходит количество женщин. Посмотрим количество данных по каждому классу, из 15833 данных мужчины составляют 11871, а женщины – 3962. С несбалансированными данными можно справиться с помощью функции `RandomUnderSampler()` – случайная недостаточная выборка. Её работа заключается в том, что она случайным образом уменьшает количество классов большинства до желаемого соотношения, по сравнению с классом меньшинства. Данный метод подходит к нашему датасету, потому что мы имеем достаточно большую выборку, в которой существует много экземпляров, расположенных близко друг к другу (см. рис. 5). После преобразования данных количество классов с меткой 0 стало равным количеству классов с меткой 1. Оно уменьшилось до 3962. Теперь алгоритм будет обучаться на 7924 данных. Этого количества данных достаточно, чтобы алгоритм хорошо обучился. На сбалансированных данных точность алгоритма составила 92 %, что на 4 % больше, чем при обучении с несбалансированными данными. Обученная машина теперь может распознавать мужчин и женщин.



Рис. 5. График данных датасета

Для проверки результата использовали датасет, который содержал 100 записей: 40 мужчин и 60 женщин. Эти данные не были включены в тренировочную и тестовую выборки. В итоге правильно были определены 40 мужчин (ошибся только на 6 женщинах). В итоге получили, что данный алгоритм машинного обучения распознает мужские и женские голоса из аудиоданных на 94 %.

## Литература

1. Руководство Librosa 0.10.1. URL: <https://librosa.org/doc/latest/tutorial.html> (дата обращения: 20.11.2023).
2. Вандер П.Дж. Python для сложных задач: наука о данных и машинное обучение. СПб. : Питер, 2018. 576 с.
3. Черкасов А.Н., Грибко И.И. Разработка системы распознавания естественного языка для идентификации голосовых данных // Вестник АГУ. 2021. Вып. 4 (291), № 3. С. 75–80.
4. Кугаевских А.В., Муромцев Д.И., Кирсанова О.В. Классические методы машинного обучения. СПб. : Университет ИТМО, 2022. 53 с.

## **MODEL OF SPEAKER GENDER RECOGNITION BASED ON AUDIO DATA**

**A.T. Mukhamatkhanova**

Student, e-mail: mukhamatkhanovaalsu@gmail.com

**T.M. Oparina**

Assistant Professor, e-mail: oparina2007@yandex.ru

Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia

**Abstract.** In this article considered the task of recognizing the speaker's gender based on audio data using the KNN method. The authors propose an algorithm for extracting features from spectrogram of audio recordings based on calculating the centroid, bandwidth, and decay of high frequencies. The extracted features are then used as input data for the KNN method. The results show that the proposed method allows achieving high accuracy in recognizing the gender of the speaker.

**Keywords:** machine learning, audio data analysis.

*Дата поступления в редакцию: 24.11.2023*

## **ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ АГРЕГАЦИИ ДАННЫХ В СЕТЯХ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОТОКОЛА MQTT**

**Т.В. Костеннов**

аспирант, e-mail: timofey.kostenov@gmail.com

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

**Аннотация.** Высокие темпы развития отрасли интернета вещей и промышленного интернета вещей приводят к увеличению количества устройств и передаваемых данных в проектируемых и используемых системах. В данной работе предложен подход, направленный на уменьшение использования сетевых ресурсов, основанный на агрегации данных на шлюзах-агрегаторах. Проведены эксперименты, позволяющие оценить предложенные подходы по параметру использования сетевых ресурсов.

**Ключевые слова:** IoT, MQTT, интернет вещей, агрегация данных.

### **Введение**

С общим развитием технологий развивается и сфера интернета вещей (Internet of Things). Этот термин зачастую используют для описания систем, концепция которых основана на связи между некоторыми физическими объектами, обладающими возможностью получать данные о внешней среде или как-либо влиять на неё. Начавшись как идея всеобъемлющего внедрения радиочастотных меток, сегодня интернет вещей представлен различными устройствами и протоколами [6].

Технологии взаимодействия между устройствами в рамках сетей интернета вещей и промышленного интернета вещей обычно обозначаются термином «M2M» (Machine-to-Machine, машинное взаимодействие). Концепция M2M предполагает отсутствие или минимальное участие человека. Быстрый рост сферы интернета вещей и применение технологий и протоколов в промышленности создают новые вызовы и проблемы для разработчиков подобных систем. По данным аналитических отчетов, в ближайшие годы индустрия интернета вещей продолжит свое развитие. Однако использование традиционных подходов к проектированию может привести к возникновению проблем при улучшении или расширении существующих систем. Одной из множества существующих проблем является ограниченная пропускная способность телекоммуникационных сетей, используемых системами интернета вещей.

Существует несколько решений, позволяющих тем или иным способом меньше использовать сетевые ресурсы. Одним из них является метод агрегации данных

при использовании протоколов прикладного уровня. Суть метода заключается в агрегации данных от конечных устройств на узлах передачи и пересылке к следующему устройству единым сообщением вместо многочисленных пересылок единичного объёма данных от каждого устройства. Предлагается подробнее рассмотреть несколько реализаций данного решения и оценить их эффективность с помощью экспериментов.

В сетях интернета вещей широкое распространение получили различные протоколы прикладного уровня, такие как MQTT, CoAP, AMQP. В экспериментах данной статьи будет рассмотрен протокол MQTT как протокол со средними требованиями к пропускной способности сети и средним размером сообщения [2].

## 1. О размере накладных расходов на пересылку сообщения

Общий размер сообщения зависит от всего стека технологий, применяемого для его пересылки. Для передачи информации современные информационные сети наиболее часто используют стек протоколов IP/TCP. Пакеты данных протоколов инкапсулируются в поле полезной нагрузки Ethernet. Рассмотрим подробнее каждый протокол, чтобы подсчитать средний размер итогового сообщения.

## 2. Ethernet

Ethernet – это протокол, работающий на канальном уровне согласно сетевой модели OSI. Использует в качестве метода управления доступом множественный доступ с контролем несущей и обнаружением коллизий (CSMA/CD, Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection). Большую часть времени сетевые устройства, подключённые к сети, находятся в режиме ожидания передачи данных по каналу связи. Когда канал свободен, то отсутствует постоянная составляющая («несущая»). В таком состоянии любое сетевое устройство, подготовившее кадр для передачи, может начать его передачу. Переданный кадр поступает на приёмники остальных устройств, подключённых к сети. Сетевое устройство распознает свой адрес, копирует этот кадр в свой приёмный буфер. После успешной передачи кадра все сетевые устройства, подключённые к шине, включая устройство-отправитель, должны выдержать межпакетную паузу IPG (Inter Packet Gap), равную времени передачи 96 бит (12 байт) данных. Если же во время передачи кадра возникла коллизия, то передача должна быть немедленно прекращена. Коллизия происходит в том случае, когда информация о том, что рабочая станция начала передачу, не достигла других станций в сети. Стандарт IEEE 802.3 определяет структуру единичного кадра протокола Ethernet со скоростью 10,100 Мбит/с следующим образом (см. табл. 1) [4].

Минимальный размер полезной нагрузки определяется требованием к минимальному размеру информационного кадра. Информационный кадр составляют поля с 3 по 8. Для стандартов Ethernet (10 Mbps) и Fast Ethernet (100 Mbps) он составляет 64 байта.

Следовательно, кадр содержит в себе от 42 (в случае, если тег 802.1Q присутствует) до 46 (в случае его отсутствия) байт полезных данных для сетевого уровня. Однако на их передачу физическая линия задействуется на время, необходимое для

Таблица 1. Структура Ethernet кадра

№	Поле	Размер (байт)
1	Преамбула	7
2	Разделитель фрейма	1
3	MAC-адрес получателя	6
4	MAC-адрес источника	6
5	Тег 802.1Q	4
6	Тип Ethernet или длина	2
7	Полезная нагрузка (минимум)	46
8	CRC-последовательность	4
9	Межпакетная пауза	12

передачи 84 байт. В рамках проводимого эксперимента тег 802.1Q отсутствует, что позволяет использовать минимум 46 байт для передачи данных при использовании линии связи в эквиваленте передачи 84 байт.

### 3. IP

IP – это протокол сетевого уровня согласно модели OSI [5]. Исходя из спецификации протокол IP не обеспечивает гарантию доставки и не отвечает за установление соединения. Заголовок пакета протокола IP имеет следующий вид (см. табл. 2).

Таблица 2. Структура заголовка протокола IP

Байт	1	2	3	4
4	Версия и длина	Тип сервиса	Полная длина	
8	Идентификатор		Флаги и указатель фрагмента	
12	Время жизни	Протокол	Контрольная сумма	
16	Адрес отправителя			
20	Адрес получателя			

### 4. TCP/UDP

TCP/UDP – это протоколы транспортного уровня, согласно модели OSI. TCP, в отличие от протокола UDP, позволяет гарантировать целостность передачи данных и устранять дублирование. В зависимости от необходимости использования механизма гарантии доставки на транспортном уровне допускается использование лю-

бого из двух протоколов. В случае использования протокола UDP реализация механизма гарантии доставки производится с помощью настроек режима качества обслуживания (QoS, Quality of Service) в протоколе MQTT [7]. Заголовок пакета UDP состоит из 8 байт и имеет следующий вид (см. табл.3) [11].

Таблица 3. Структура заголовка протокола UDP

1 байт	2 байта	3 байта	4 байта
Порт отправителя		Порт получателя	
Длина сообщения		Контрольная сумма	

Заголовок протокола TCP минимально состоит из 20 байт и имеет следующий вид (см. табл. 4) [10].

Таблица 4. Структура заголовка протокола TCP

Байт	1	2	3-4
0	Порт отправителя		Порт получателя
4	Порядковый номер		
8	Номер подтверждения		
12	Длина заголовка и флаги		Размер окна
16	Контрольная сумма		Указатель важности
20	Опции и смещение		

В рамках проводимого эксперимента предлагается использовать протокол UDP.

## 5. Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)

MQTT – это легковесный сетевой протокол обмена сообщениями по принципу «издатель – подписчик» (publisher/subscriber). MQTT разрабатывался как способ поддержания связи между устройствами в сетях с ограниченной пропускной способностью или непредсказуемой связью. Впервые протокол MQTT был опубликован консорциумом OASIS (Organization for the Advancement of Structured Information Standards) в октябре 2014 г. Данный стандарт находится в открытом доступе [8]. MQTT – один из вариантов для разработчиков, которые создают приложения и устройства с надёжной функциональностью и широкой совместимостью с подключёнными к интернету устройствами и приложениями, включая браузеры, смартфоны и устройства IoT [3].

Протокол MQTT построен по шаблону «издатель – подписчик». В соответствии с данным шаблоном отправители, именуемые издателями, не связаны напрямую с получателями, именуемыми подписчиками, и, как правило, разделены. Разделение может быть организовано в различных плоскостях:



- Издатель и подписчик не общаются напрямую – разделение в пространстве.
- Издатель и подписчик могут быть включены в разное время – разделение во времени.
- Издатель и подписчик не приостанавливают выполнение операций в процессе публикации или получения информации – разделение в синхронизации.

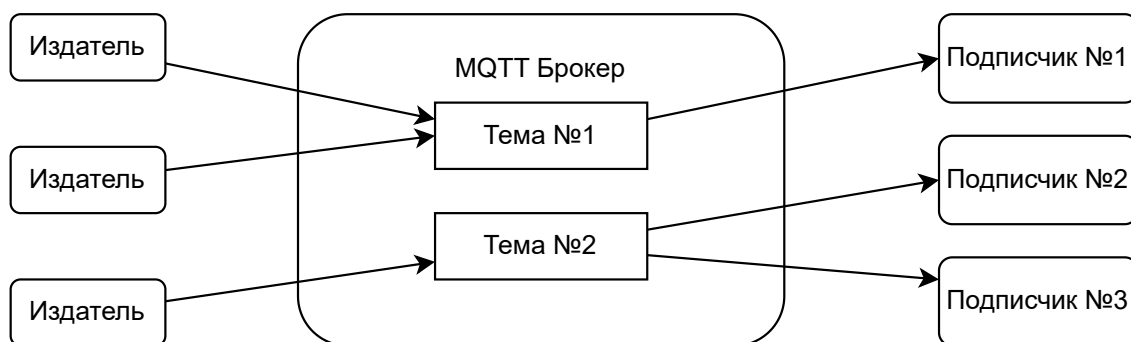


Рис. 1. Архитектура протокола MQTT

Координацией и передачей сообщений управляет брокер (см. рис. 1). Упрощённый процесс обмена данными в такой системе можно описать следующим образом:

1. Издатель отправляет данные с указанием темы, к которой относятся эти данные, брокеру.
2. Брокер отправляет данные подписчикам, имеющим подписку на указанную тему.

Любое количество подписчиков может быть подписано на любое количество тем и получать с помощью этого механизма различные данные без необходимости контактировать напрямую с издателем. Тема представляет собой строку из символов с кодировкой UTF-8. Структура тем имеет формат дерева, что облегчает их организацию. Различные уровни дерева тем разделяются с помощью символа «/» [7].

Протокол поддерживает три уровня надёжности доставки (качества обслуживания):

- 0 – без подтверждения доставки сообщения;
- 1 – с подтверждением доставки;
- 2 – с подтверждением доставки без дублирования.

Пакет протокола состоит из трёх частей (см. табл. 5):

1. Фиксированного заголовка, содержащего в себе информацию о типе сообщения, необходимости дублирования, качестве обслуживания, длине сообщения.

2. Переменного заголовка, содержащего в себе идентификатор пакета, название и версию протокола, флаги соединения.
3. Кадра данных, содержащего в себе полезные данные.

Таблица 5. Структура заголовка протокола MQTT

Бит	7	6	5	4	3	2	1	0
1 байт	Тип сообщения			Вспомогательные флаги				
2 байта	Длина сообщения							

## 6. Дизайн эксперимента

Проведены два эксперимента, в каждом из которых рассмотрены два различных подхода к агрегации и упаковке данных в системах интернета вещей. В первом эксперименте предлагалось сравнить затраты пропускной способности сети при использовании 5 датчиков, 5 шлюзов-агрегаторов и 1 сервера и при использовании 5 датчиков, 1 шлюза-агрегатора и 1 сервера. В каждой из двух систем датчики передают показания шлюзам-агрегаторам один раз в 5 отсчётов времени. Шлюзы-агрегаторы передают данные серверу один раз в 5 отсчётов времени.

Во втором эксперименте предлагалось сравнить затраты пропускной способности сети между системами, использующими 5 датчиков, 1 шлюз-агрегатор и 1 сервер, где датчики передают информацию агрегатору раз в 1, 3, 5, 7 и 9 отсчётов времени соответственно. Шлюз-агрегатор первой системы передаёт данные серверу по мере поступления данных от датчиков, в то время как шлюз-агрегатор второй системы передаёт данные раз в  $t_{TT}$  отсчётов времени

$$t_{TT} = t_{MSD}, \quad (1)$$

где  $t_{TT}$  – период для передачи данных,  $t_{MSD}$  – наибольший период передачи данных среди всех датчиков.

Единичным отсчётом времени для каждого из экспериментов принята 1 секунда. Одно измерение датчика представляется 2 байтами данных.

Все эксперименты проведены не менее 10 раз для обеспечения выборки не менее чем 10 повторений для получения средних значений с приблизительно нормальным распределением. Это позволяет уменьшить влияние возможных шумов измерений.

Оба эксперимента предполагают использование датчиков, собирающих информацию о внешней среде, подключённых к устройствам – шлюзам-агрегаторам, и пересылку данных от шлюзов-агрегаторов к серверу с использованием Ethernet соединения.

В каждом из экспериментов данные, получаемые шлюзом-агрегатором от датчиков, упаковывались в сообщение протокола MQTT, затем – в сообщение протокола UDP, затем – в сообщение протокола IP и передавались через Ethernet.

Размер сообщения для одной передачи через Ethernet-соединение вычисляется по формуле

$$b = d_s + c_{MQTT} + c_{UDP} + c_{IP}, \quad (2)$$

где  $b$  – размер сообщения,  $d_s$  – данные от датчиков,  $c_{MQTT}$  – заголовок протокола MQTT,  $c_{UDP}$  – заголовок протокола UDP,  $c_{IP}$  – заголовок протокола IP. Если размер сообщения не превышает минимальный размер данных, передаваемых через протокол Ethernet, размер сообщения принимается равным 46 байтам.

В первой системе первого эксперимента каждому датчику соответствует свой шлюз-агрегатор (см. рис. 2). Датчики опрашиваются каждые 5 секунд. Каждые 5 секунд каждый шлюз-агрегатор отправляет данные серверу. Спустя 600 секунд рассчитывается среднее значения метрики. Это позволяет отфильтровать возможные шумы измерений.

Во второй системе первого эксперимента всем датчикам соответствует единственный в системе шлюз-агрегатор (см. рис. 3). Датчики так же, как и в первом эксперименте, опрашиваются каждые 5 секунд. Каждые 5 секунд шлюз-агрегатор отправляет данные серверу.

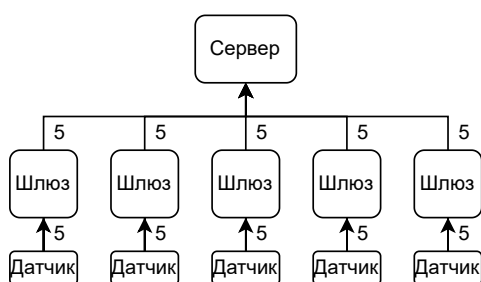


Рис. 2. Структурная схема сети первой системы первого эксперимента

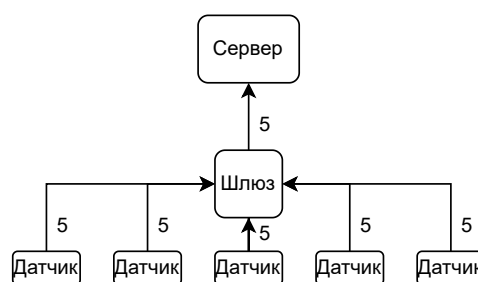


Рис. 3. Структурная схема сети второй системы первого эксперимента

В первой системе второго эксперимента каждому датчику соответствует единственный в системе шлюз-агрегатор (см. рис. 4). Каждый из 5 датчиков имеет своё время опроса, равное 1, 3, 5, 7 и 9 секундам соответственно. Шлюз-агрегатор отправляет данные серверу по мере их получения. Спустя 600 секунд рассчитывается среднее значения метрики.

Во второй системе второго эксперимента каждому датчику соответствует единственный в системе шлюз-агрегатор (см. рис. 5). Каждый из 5 датчиков имеет своё время опроса, равное 1, 3, 5, 7 и 9 секундам соответственно. Шлюз-агрегатор отправляет данные серверу каждые 9 секунд. Спустя 600 секунд рассчитывается среднее значения метрики.

Для протокола MQTT каждый из шлюзов-агрегаторов логически представлял собой «издателя», а сервер – «подписчика». Ожидаемые затраты пропускной способности для каждого из экспериментов были вычислены по формуле

$$bc = ((b + 38) * dtc) / t, \quad (3)$$

где  $bc$  – ожидаемые затраты пропускной способности,  $b$  – размер сообщения для

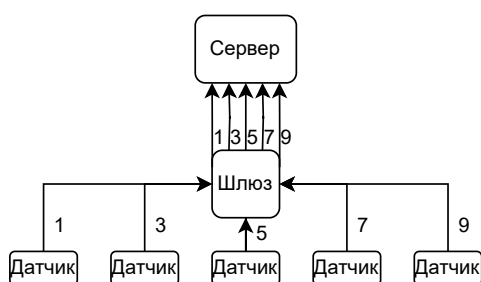


Рис. 4. Структурная схема сети первой системы второго эксперимента

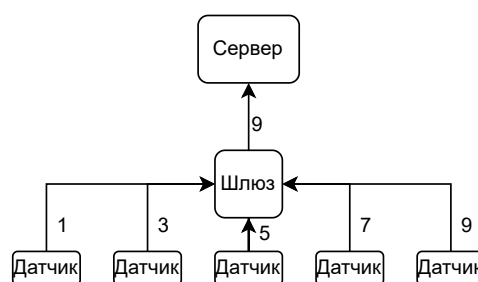


Рис. 5. Структурная схема сети второй системы второго эксперимента

передачи через Ethernet соединение,  $dtc$  – количество передач данных,  $t$  – период передачи данных (см. табл. 6).

Таблица 6. Ожидаемые затраты пропускной способности

Эксперимент	Затраты пропускной способности, Б/с
1	84
2	16,8
3	150,13
4	9,33

## 7. Используемые инструменты

В эксперименте были использованы цифровые датчики температуры DS18B20. Датчики подключены к SoC-системам ESP8266, представляющим шлюзы-агрегаторы с использованием интерфейса 1-Wire. Такие системы используются для проектирования устройств интернета вещей [9]. Сервер использует платформу Raspberry Pi 4 и Raspbian Kernel 6.1. Подключение шлюзов-агрегаторов к серверам осуществляется с помощью интегральной схемы Ethernet контроллера W5500 через интерфейс SPI.

Для реализации брокера протокола MQTT использованы инструменты с открытым исходным кодом Mosquitto [1]. Существуют и другие реализации, однако используемые в данном эксперименте имеют открытый исходный код и подробную документацию. Для сбора данных о работе сети используется инструмент tcpdump.

В обоих экспериментах настройки качества обслуживания протокола MQTT установлены в состояние «At most once» для большей прозрачности эксперимента. Использование протокола UDP одновременно с отключением настройки качества обслуживания означает отсутствие в эксперименте механизма гарантии доставки сообщений. Предполагается, что в рамках эксперимента сбои соединений будут отсутствовать и все сообщения достигнут адресатов.

## 8. Результаты экспериментов

Как было описано ранее, было проведено два эксперимента для оценки затрат пропускной способности сети с использованием разных топологий сети интернета вещей.

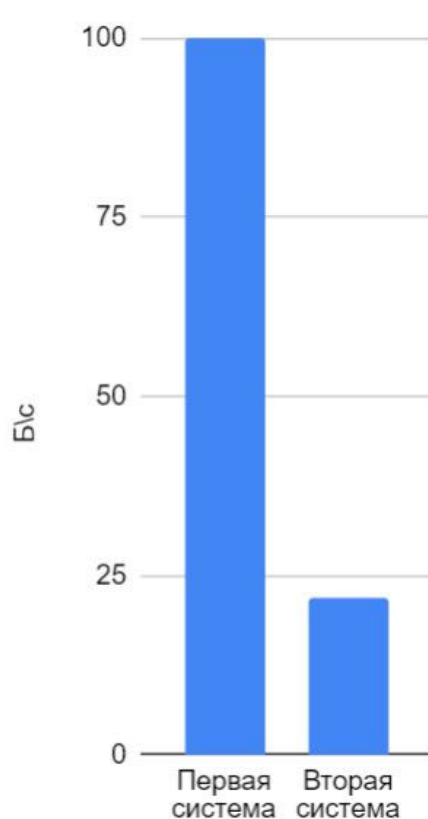


Рис. 6. Структурная схема сети первой системы второго эксперимента

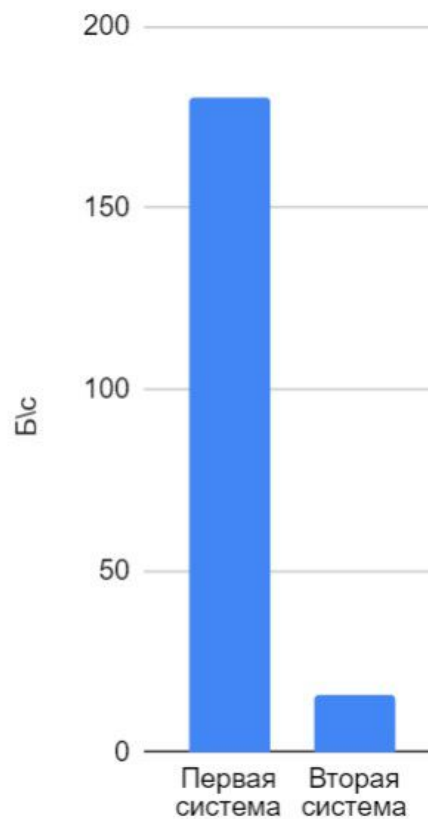


Рис. 7. Структурная схема сети второй системы второго эксперимента

## 9. Первый эксперимент

С точки зрения затрат пропускной способности сети (см. рис. 6) наибольшее среднее значение, а значит, и наибольшее использование сетевых ресурсов имеет первая система со значением 99,96 Б/с. Вторая система, имеющая такой же период передачи данных, но содержащая в 5 раз меньшее количество шлюзов-агрегаторов, а соответственно, и в 5 раз меньшее количество пересылок данных, имеет затраты пропускной способности сети на уровне 21,94 Б/с. Разница между значениями составляет 78,02 Б/с, или примерно 78 %. Ожидаемая на основании расчётов разница составляет 80 %. Погрешность вносят передачи данных для установки соединения и физическая реализация каналов связи.

## 10. Второй эксперимент

С точки зрения затрат пропускной способности сети (см. рис. 7) наибольшее среднее значение, а значит, и наибольшее использование сетевых ресурсов имеет первая система со значением 185,29 Б/с. Вторая система, имеющая такое же количество шлюзов-агрегаторов, но передающая данные не по мере поступления, а при накоплении данных от всех датчиков, имеет затраты пропускной способности сети на уровне 15,96 Б/с. Разница между значениями составляет 78,02 Б/с, или примерно 91 %. Ожидаемая на основании расчётов разница составляет примерно 93 %. Погрешность вносят передачи данных для установки соединения и физическая реализация каналов связи.

## 11. Выводы

Исходя из результатов обоих экспериментов можно сказать, что различные методы агрегации данных в сетях интернета вещей являются эффективным средством для снижения используемых сетевых ресурсов. Уменьшение количества соединений для передачи данных при небольшом размере полезной нагрузки приводит к тому, что большая часть передаваемых данных не несёт в себе пользы для работы системы, а выступает служебной информацией для обеспечения соединения. Увеличивая часть с полезной нагрузкой в таких сообщениях, можно добиться снижения доли служебных данных в соединениях.

Однако замену нескольких устройств шлюзов-агрегаторов одним следует использовать с осторожностью, поскольку такой подход повышает опасность выхода из строя всей системы из-за отказа одного устройства.

Если же целью ставится ещё большая оптимизация использования ресурсов сети и уплотнение данных, следует обратить внимание на более низкоуровневые или специализированные протоколы, позволяющие использовать меньше служебной информации в организации межмашинных связей в сетях интернета вещей.

Данные эксперименты проводились без углублённой настройки каждого протокола под различные возможные задачи и без модификаций для использования служебных полей в передаче полезных данных, поскольку для обеспечения совместимости в системах интернета вещей зачастую используются стандартные протоколы.

## 12. Заключение

Грамотное использование сетевых ресурсов является одним из важных аспектов в проектировании, построении и эксплуатации систем интернета вещей. Рост отрасли за последние годы создаёт новые вызовы для разработчиков протоколов и стандартов связи. Оптимизация передачи данных в сетях интернета вещей позволяет использовать большее количество устройств в рамках одного и того же объёма сетевых ресурсов. В данной статье рассмотрено теоретическое предложение об уменьшении использования сетевых ресурсов с помощью агрегации данных и использования в передаче большей доли полезных ресурсов. Были проведены эксперименты, в результате которых теоретические предположения были подтверждены.

## Литература

1. Корзухин С.В., Хайдарова Р.Р., Шматков В.Н. Конфигурируемые IoT-устройства на основе SOC-систем ESP8266 и протокола MQTT // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20, № 5. С. 722–728.
2. Костеннов Т.В. Сравнение протоколов связи для организации M2M-взаимодействий в SCADA-системах и системах промышленного интернета вещей // Математические структуры и моделирование. 2023. № 2 (66). С. 91–102.
3. Ли П. Архитектура интернета вещей / перевод с английского М.А. Райтман. М. : ДМК Пресс, 2019. 454 с.
4. IEEE 802.3 ETHERNET. URL: <https://www.ieee802.org/3/> (дата обращения 24.10.2023).
5. Internet Protocol, Protocol Specification. URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc791.txt> (дата обращения 24.10.2023).
6. Ashton K. That ‘Internet of Things’ Thing. In the real world, things matter more than ideas. // RFID Journal. 2009. URL: <http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986> (дата обращения 24.10.2023).
7. MQTT Specification. URL: <https://mqtt.org/mqtt-specification/> (дата обращения 11.11.2023).
8. OASIS Standard – MQTT Version 3.1.1. URL: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html> (дата обращения 24.10.2023).
9. Light R.A. Mosquitto: server and client implementation of the MQTT protocol // Journal of Open Source Software. 2017. Vol. 2, No. 13. P. 265.
10. Transmission Control Protocol. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc793> (дата обращения 24.10.2023).
11. User Datagram Protocol. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc768> (дата обращения 24.10.2023).

### THE EFFECTIVENESS OF DATA AGGREGATION IN INTERNET OF THINGS NETWORKS USING THE MQTT PROTOCOL

**T.V. Kostenov**

Ph.D. Student, e-mail: [timofey.kostenov@gmail.com](mailto:timofey.kostenov@gmail.com)

Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia

**Abstract.** The high pace of development of the Internet of Things and Industrial Internet of Things industry leads to an increase in the number of devices and transmitted data in designed and used systems. This paper proposes an approach aimed at reducing the use of network resources, based on data aggregation on aggregator gateways. Experiments were carried out to evaluate the proposed approaches in terms of the use of network resources.

**Keywords:** IoT, MQTT, internet of things, data aggregation.

*Дата поступления в редакцию: 24.11.2023*

## **МОДЕЛЬ АРХИТЕКТУРЫ ПРИЛОЖЕНИЯ, РЕАЛИЗУЮЩЕГО СХЕМУ ЭЛЕКТРОННОГО ТАЙНОГО ГОЛОСОВАНИЯ HE-SU**

**Д.Д. Лаврова<sup>1</sup>**

студент, e-mail: drlvrv@gmail.com

**Д.Н. Лавров<sup>2</sup>**

канд. техн. наук, доцент, e-mail: dmitry.lavrov72@gmail.com

<sup>1</sup>Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

<sup>2</sup>Нижевартовский государственный университет, Нижневартовск, Россия

**Аннотация.** В статье предлагается описание объектно-ориентированной модели приложения, реализующего схему электронного тайного голосования на основе схемы He-Su. Для реализации схемы нужно выбрать три базовых криптографических схемы: хэширования, симметричную криптосистему и асимметричную криптосистему с возможностью подписания вслепую. На основе анализа построенной модели предложена архитектура на основе абстракций, позволяющая легко выбирать и заменять одни базовые криптографические системы на другие, используемые в схеме.

**Ключевые слова:** электронное тайное голосование, слепая подпись, криптосистемы, криптографические протоколы, схема He-Su.

### **Введение**

Процесс голосования, как правило, проводится вживую, так как на данный момент это самый проверенный способ сохранить в тайне личность голосующего. Однако для современного состояния мира (возникновение пандемий, с одной стороны, и цифровой трансформации экономики и других сфер жизни – с другой) удобнее, если это все проводилось бы в дистанционной форме или, как говорят, в электронной форме, подразумевая использование компьютерных сетей для проведения данной процедуры. При этом проблема обеспечения тайности (анонимности) голосования становится ещё более актуальной.

В настоящее время известно несколько схем электронного тайного голосования.

1. Тривиальный алгоритм. Представляет собой переписку между избирательной комиссией и избирателями с использованием алгоритмов электронно-цифровой подписи. Требуется полное доверие избирательной комиссии.
2. ANDOS (1987). Стойкость схемы усиливается за счёт замены заранее выбранного шифрования с секретным ключом на хэширование пользовательской функцией [1]. К недостаткам можно отнести то, что избирательная комиссия



может распределять по своему выбору голоса тех, кто заявил о своём намерении принять участие в голосовании, но так и не совершил свой выбор, а избиратель имеет соблазн продажи голосов, так как имеет возможность убедиться в результате сделки.

3. Протокол двух агентств (1991). Основная идея состоит в замене одного избирательного агентства двумя, чтобы они контролировали друг друга. К сожалению, избирательная комиссия может манипулировать голосованием: может специально не принимать сообщения от некоторых избирателей. Присутствует и проблема «мёртвых душ», когда проголосовать могут за тех, кто не пришёл на выборы.
4. Fujioka-Okamoto-Ohta (1992). Базируется на протоколе двух агентств и криптографической подписи вслепую. Частично решает проблему сговора регистратора и избирательной комиссии. Маскирующее преобразование должно быть перестановочным с электронной подписью, т. е.  $\text{sign}(\text{blind}(B)) = \text{blind}(\text{sign}(B))$  [2]. Имеется проблема «мёртвых душ». Необходима дополнительная доработка, чтобы позволить избирателю переголосовать, например, из-за технической ошибки.
5. He-Su (1998). Использует идею слепой подписи, но подписывается не бюллетень избирателя, а его ключ. Это позволяет голосующим изменять своё решение до конца голосования. Маскирующее преобразование должно быть перестановочным с электронной подписью избирателя:  $\text{sign}(\text{blind}(B)) = \text{blind}(\text{sign}(B))$ , а также подпись должна обладать свойством мультипликативности:  $\text{sign}(A \cdot B) = \text{sign}(A) \cdot \text{sign}(B)$  [3]. Избиратели могут переголосовать до объявления окончания выборов. Кроме требовательности к ресурсам, других недостатков не отмечается.

Из краткого описания протоколов видно, что наиболее защищёнными и изученными являются схемы Fujioka-Okamoto-Ohta и He-Su. За основу нашей программной реализации был выбрана схема He-Su.

Схема электронного тайного голосования He-Su представляет собой систему, состоящую из трёх протоколов, в которых для обеспечения сохранения личности голосующего используются алгоритмы электронной подписи и хэширования. Замена одних криптографических систем на другие делает приложение более расширяемым. В частности, позволяет произвести переход на постквантовые алгоритмы криптографии и избавиться от проблемы «взлома из будущего» [4]. Достичь расширяемости можно, как будет показано далее, с использованием программных абстракций. Таким образом, целью данной статьи является представление объектно-ориентированной модели архитектуры программного обеспечения, реализующей схему He-SU с выполнением требования расширяемости кода на основе абстракций.

## 1. Описание схемы He-Su

При описании схемы будем в основном следовать оригинальной работе [3], указывая на особенности, влияющие на реализацию. Схема описывает взаимодействие между тремя исполнителями:

- избиратель ( $V$  – Voter) – гражданин, имеющий право голоса;
- регистратор ( $A$  – Authority) – комиссия, проверяющая право избирателя голосовать, подписывающая «вслепую» подписываемый ключ избирателя для голосования, т. е. без возможности узнать и использовать этот ключ от имени избирателя;
- счётная комиссия ( $T$  – Tallier) – комиссия, принимающая заполненные бюллетени избирателей, подсчитывающая голоса и публикующая результаты выборов.

Схема состоит из трёх протоколов:

- протокол регистрации;
- протокол подсчёта ключей;
- протокол подсчёта голосов и объявления результатов.

Рассмотрим каждый из них более подробно.

### 1.1. Протокол регистрации

Протокол регистрации используется для того, чтобы избиратели могли зарегистрироваться для участия в выборах.

Регистратор  $A$  должен сгенерировать свои ключи зашифрования и расшифрования:  $E_a$  и  $D_a$ .

Избиратель  $V$  (Voter):

1. Генерирует пару ключей  $D_v, E_v$ , где  $D_v$  – ключ голосования (секретный ключ), используемый для подписи бюллетеня, и  $E_v$  – публичный ключ зашифрования для подсчёта голосов, который должен быть вслепую подписан регистратором  $A$ .
2. Генерирует случайное число  $R$ , для маскирования подписи своего ключа зашифрования.
3. Вычисляет:  $E_a(R) \times (h(E_v))$  и отправляет его в орган  $A$ .

Регистратор  $A$  :

1. Проверяет право голосования избирателя  $V$ .
2. Если  $V$  имеет право голосовать, то  $A$  подписывает данные, полученные от  $V$ :

$$D_a(E_a(R) \times (h(E_v))) \rightarrow R \times D_a(h(E_v))$$

и отправляет подписанные данные  $R \times D_a(h(E_v))$  обратно избирателю  $V$ .

Избиратель V:

1. Удаляет  $R$  из  $R \times D_a(h(E_v))$ :

$$R \times D_a(h(E_v)) \times R^{-1} \rightarrow D_a(h(E_v)).$$

2. Проверки:

$$h(E_v) = E_a(D_a(h(E_v))).$$

Если равенство выполняется, избиратель V может быть уверен, что  $D_a(h(E_v))$  является подписью его ключа подсчёта голосов  $E_v$ .

По истечении времени, отведённого на процедуру регистрации, регистратор A публикует список всех зарегистрированных избирателей.

### 1.2. Протокол регистрации ключей

В этом протоколе избиратели предоставляют счётной комиссии (Т) свои ключи для подсчёта голосов с прикреплённой подписью, вслепую подписанной избирательной комиссией (А). В дальнейшем ключи для подсчёта голосов будут использоваться для проверки действительности бюллетеней.

Избиратель V:

1. Отправляет счётной комиссии Т:

$$(E_v, D_a(h(E_v))).$$

Счётная комиссия Т:

1. Проверяет подлинность ключа счета V путём вычисления:

$$h(E_v) \rightarrow E_a(D_a(h(E_v))).$$

2. Если равенство выполняется, ключ для подсчёта голосов  $E_v$  авторизован.

Примечание. По истечении крайнего срока подачи счётная комиссия публикует все авторизованные счётные ключи.

### 1.3. Протокол голосования и подсчёта голосов

Избиратели подписывают свои бюллетени своим ключом для голосования и отправляют свои бюллетени вместе с подписью. Этап голосования и подсчёта голосов разделяется на два подэтапа. Вместо того, чтобы отправлять бюллетени напрямую, избиратели просто отправляют зашифрованные бюллетени с подписью на первом подэтапе. Прежде чем избиратели представят свои ключи для расшифровки зашифрованных бюллетеней, счётная комиссия публикует все зашифрованные бюллетени с прикреплёнными подписями, чтобы каждый избиратель мог проверить, подсчитан ли его бюллетень. Таким образом, у избирателей будет возможность исправить ошибочно подсчитанные бюллетени, не раскрывая бюллетень.

Избиратель V:

1. Отправляет в счётную комиссию T:

$$E_v, K_v(B_v), D_v(h(K_v(B_v))).$$

Счётная комиссия T:

1. Проверяет, находится ли  $E_v$  в списке авторизованных ключей подсчёта, затем проверяет подлинность подписи  $D_v(h(K_v(B_v)))$  зашифрованного бюллетеня  $K_v(B_v)$  путём проверки равенства:

$$E_v(D_v(h(K_v(B_v)))) \rightarrow h(K_v(B_v)).$$

2. Если  $E_v$  находится в списке авторизованных ключей для подсчёта голосов и равенство справедливо для всех избирателей, счётная комиссия публикует:

$$E_v, K_v(B_v), D_v(h(K_v(B_v))).$$

Избиратель V:

1. Проверяет, был ли его зашифрованный бюллетень включён в опубликованный зашифрованный список для голосования. Если нет, то может исправить это, опубликовав:

$$E_v, K_v(B_v), D_v(h(K_v(B_v))).$$

2. Отправляет T:

$$E_v, K_v, D_v(h(K_v)).$$

Счётная комиссия T:

1. Проверяет подлинность  $K_v$  путём вычисления:

$$E_v(D_v(h(K_v))) \rightarrow h(K_v).$$

2. Если  $K_v$  действителен, T расшифровывает  $K_v(B_v)$  следующим образом:

$$K_v^{-1}(K_v(B_v)) \rightarrow B_v.$$

Публикует все аутентифицированные данные:

$$B_v, K_v(B_v), K_v, D_v(h(K_v(B_v))), D_v(h(K_v)), E_v$$

для всеобщей проверки.

## 2. Модели протоколов схемы He-Su

Как видно из предыдущего раздела, схема He-Su состоит из трёх протоколов, описание которых есть не что иное как описание трёх вариантов использования (трёх прецедентов). Методика разработки на основе анализа прецедентов представлена в [5]. На основе этой методики разработана концептуальная модель предметной области на языке UML (рис. 1).

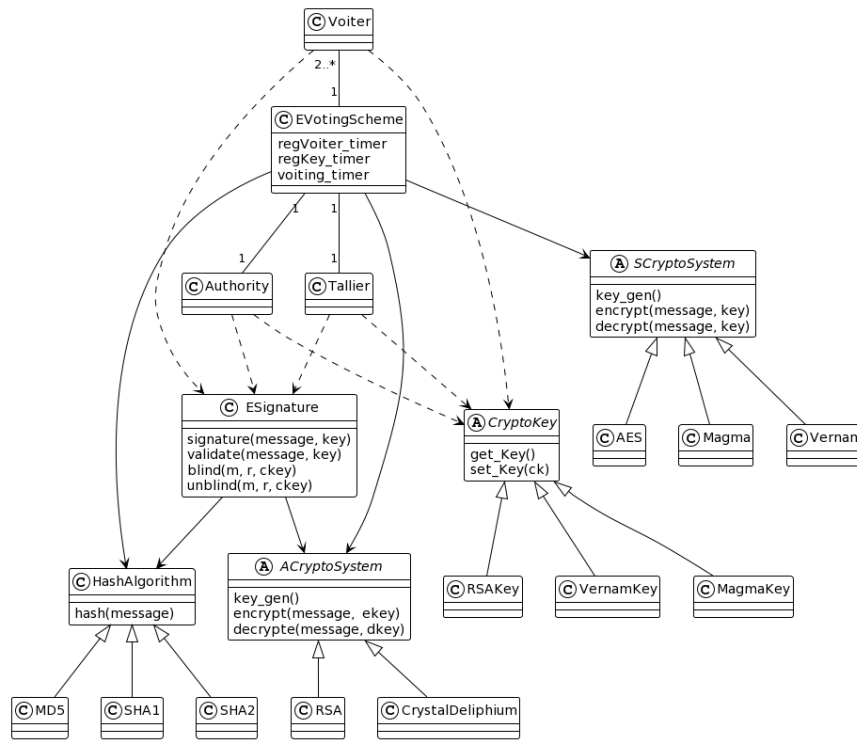


Рис. 1. Модель понятий предметной области, построенная на основе анализа протоколов электронного тайного голосования схемы He-Su



Рис. 2. Диаграмма последовательности протокола регистрации избирателей

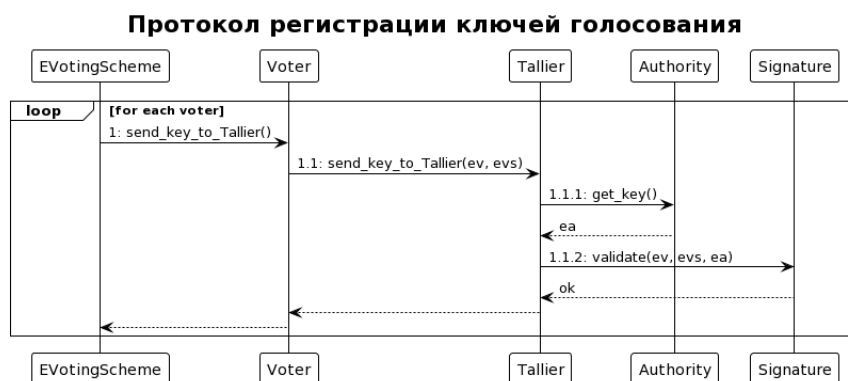


Рис. 3. Диаграмма последовательности протокола регистрации ключей голосования



Рис. 4. Диаграмма последовательности протокола голосования и подсчёта голосов

В данной модели архитектуры заложена возможность изменения конкретных реализаций криптографических алгоритмов за счёт использования абстракций в основной схеме электронного тайного голосования.

Описание протоколов схемы He-Su можно представить на UML-диаграммах последовательностей. Предполагается, что в реализации каждый класс Voter, Authority и Tallier будет работать как отдельный сервис или клиент.

Протокол регистрации избирателей представлен на диаграмме последовательности (рис. 2). На диаграмме для упрощения представления опущены обращения к объекту HashAlgorithm. С точки зрения схемы голосования он состоит всего из трёх шагов: 1) генерация пары ключей для зашифрования и расшифрования регистратором; 2) генерация пары ключей для зашифрования и расшифрования избирателем; 3) «слепое» подписание ключа голосующего. Но второй и третий шаги повторяются в цикле для каждого избирателя.

Алгоритм регистрации ключей голосования (рис. 3) сводится к валидации электронной подписи ключа голосования.

### 3. Заключение

Основными результатами данной работы является:

- объектная декомпозиция схемы He-Su;
- расширяемая архитектура приложения, которая достигается за счёт использования абстракций в основной схеме;
- модели работы протоколов регистрации избирателей, регистрации ключей голосования, голосования и подсчёта голосов представлены в виде диаграмм последовательностей.

По результатам представленной разработки был создан прототип приложения на языке Python, реализующий схему He-Su с электронной подписью на основе криптосистемы RSA и хэширования SHA-1. Шифрование бюллетеней реализовано на базе шифра Вернама, используемого в режиме одноразового блокнота.

### Литература

1. Brassard G., Crepeau C., Robert J.-M. All-or-Nothing Disclosure of Secrets // Crypto.cs.mcgill.ca. URL: <https://crypto.cs.mcgill.ca/~crepeau/PDF/ASPUBLISHED/BCR86.pdf> (дата обращения: 26.11.2023).
2. Fujioka, A., Okamoto, T., Ohta, K. A practical secret voting scheme for large scale elections // ASIACRYPT'92 : Proceedings of the Workshop on the Theory and Application of Cryptographic Techniques: Advances in Cryptology. Berlin; Heidelberg : Springer-Verlag, 1992. P. 244–251.
3. He Q., Su Z. A New Practical Secure e-Voting Scheme // Cs.cmu.edu. URL: [http://www.cs.cmu.edu/~qihe/paper/e\\_voting](http://www.cs.cmu.edu/~qihe/paper/e_voting) (дата обращения: 19.11.2023).
4. Лаврова Д.Д. Требования к реализации электронного тайного голосования // Молодёжь третьего тысячелетия : сборник научных статей. Т. 1. Ч. 1. Омск : Издательство Омского государственного университета, 2023. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_54140614\\_81386086.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_54140614_81386086.pdf) (дата обращения: 26.11.2023).
5. Ларман К. Применение UML 2.0 и шаблонов проектирования. М. : Издательский дом «Вильямс», 2004. 624 с.

**ARCHITECTURE MODEL OF AN APPLICATION IMPLEMENTING THE HE-SU  
ELECTRONIC SECRET VOTING SCHEME**

**D.D. Lavrova**<sup>1</sup>

Student, e-mail: drlvrv@gmail.com

**D.N. Lavrov**<sup>2</sup>

Ph.D. (Techn.), Associate Professor, e-mail: dmitry.lavrov72@gmail.com

<sup>1</sup>Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia

<sup>2</sup>Nizhneartovsk State University, Nizhneartovsk, Russia

**Abstract.** The article offers a description of an object-oriented model of an application that implements an electronic secret voting scheme based on the He-Su scheme. To implement the scheme, you need to choose three basic cryptographic schemes: hashing, a symmetric cryptosystem and an asymmetric cryptosystem with the ability to blindly sign. Based on the analysis of the constructed model, an architecture based on abstractions is proposed, which makes it possible to easily select and replace some basic cryptographic systems with others used in the scheme.

**Keywords:** electronic secret voting, blind signature, cryptosystems, cryptographic protocols, He-Su scheme.

*Дата поступления в редакцию: 23.11.2023*



## **ОТ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОСНОВ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ К ХАКЕРСПЕЙСУ ДЛЯ ИЗОБРЕТАТЕЛЕЙ И СОРЕВНОВАТЕЛЬНОМУ КИБЕРПОЛИГОНУ**

**С.В. Гусс**

старший преподаватель, e-mail: sviat@v-guss.ru

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

**Аннотация.** Рассматривается проблема перехода от обычного лабораторного стенда для изучения основ функционирования компьютерных сетей к проектному хакерспейсу для изобретателей и соревновательному киберполигону для проведения различных мероприятий: хакатонов, чемпионатов, олимпиад. Рассматриваются конкретные примеры программного и аппаратного обеспечения для настройки и развёртывания необходимой инфраструктуры.

**Ключевые слова:** стенд, хакерспейс, киберполигон.

### **Введение**

Цифровая трансформация образования, направленная на совершенствование цифровой образовательной среды должна способствовать формированию у студентов средних и высших учебных заведений ценностей и смыслов, мотивирующих обучающихся на саморазвитие и самообразование.

Не лишним будет вспомнить высказывание А. Эйнштейна, согласно которому «бессмысленно продолжать делать то же самое и ждать других результатов». Этой цитатой зададим пульс повествования и рассмотрим переход от традиционной учебно-лабораторной базы к системе, соответствующей реалиям современной жизни и отвечающей ожиданиям нового поколения. А более конкретно – поколению Z, согласно теории поколений Хоува – Штрауса. Поколению художников, стремящихся к изобретательству и креативу, не представляющих своей жизни без мобильных устройств и Интернета.

Вначале попробуем разобраться с тем, что такое лабораторный стенд, его цифровой двойник – виртуальный стенд и зачем, собственно, изобретать киберполигон. Также посмотрим, из чего всё это состоит, как и где используется.

Итак, что такое лабораторный стенд?

**Лабораторный стенд** – это физически доступный набор некоторого оборудования, инструментов и компонентов, используемых для проведения экспериментов, исследований или обучения конкретным навыкам. Стенды могут быть предназначены для различных целей, таких как изучение принципов работы различных устройств, тестирование новых технологий, обучение студентов и т. д.

Здесь сложностей с интерпретацией быть не должно. Термин устоявшийся. Лабораторные стенды используются в различных областях и служат главным образом для целей обучения. Особенно когда речь идёт о каких-то опасных и дорогостоящих объектах, к работе с которыми требуется особый допуск в связи с его степенью критичности и возможным ущербом. Стоит заметить, что лабораторный стенд не всегда соответствует реальному оборудованию или среде, а может имитировать их для развития каких-то элементарных, общих навыков. Сегодня всё чаще прибегают к технологиям виртуализации и созданию цифровых двойников.

И тут мы приходим к понятию виртуального лабораторного стенда.

**Виртуальный лабораторный стенд** – это программно-аппаратная система, которая имитирует реальный лабораторный стенд, обычно используемый для научных или технических исследований. Виртуальные лабораторные стенды позволяют проводить эксперименты и исследования без наличия физического оборудования, что снижает затраты на проведение экспериментов и в некоторых случаях помогает справиться со сложностью организации процесса. Они также обеспечивают большую безопасность и контроль в рамках экспериментов, так как нет риска получения травм или повреждения оборудования. Виртуальные стенды могут быть использованы для обучения, исследований, разработки и проверки новых идей или концепций.

В последнее время всё чаще можно услышать такое слово, как киберполигон, особенно в контексте обучения специалистов по направлениям кибербезопасности, главным образом когда речь идёт об анализе уязвимостей компьютерных сетей и организации тестов на проникновение за периметр сетевой инфраструктуры предприятия.

**Киберполигон** – это виртуальная среда, имитирующая реальную компьютерную сеть или систему в целях обучения, тестирования и оценки знаний и умений специалистов в области информационной безопасности. Киберполигон позволяет моделировать различные ситуации, связанные с сетевыми атаками, уязвимостями, несанкционированным доступом и другими угрозами, с которыми могут столкнуться специалисты в реальной жизни. Киберполигоны часто используются для проведения соревнований и конкурсов по кибербезопасности.

## 1. Лабораторные стенды

Самое очевидное решение для организации практических занятий – создание лабораторного стенда. Обучающиеся могут прикоснуться к реальному оборудованию, протестировать его, посмотреть на то, как устройства откликаются и реагируют на те или иные действия со стороны пользователя. В тех случаях, когда разместить в лаборатории реальное оборудование не представляется возможным ввиду ограничений по стоимости, размерам, среде функционирования и другим соображениям, создаются специальные макеты или симуляторы, по своим реакциям и взаимодействию с пользователем соответствующие реальному оборудованию.

Например, в лаборатории сетей и систем передачи информации можно разместить специальную стойку, или несколько стоек, с установленным в ней сетевым оборудованием, таким как концентраторы, коммутаторы, маршрутизаторы, межсетевые экраны, устройства обнаружения и предотвращения вторжений, серверы вир-

туализации для развёртывания программных реализаций сетевых устройств и т. д. Всё это хорошо, но для полноценного знакомства с полным спектром сетевых устройств придётся потратить немалую сумму плюс учесть расходы на поддержание всего этого в рабочем, стабильном состоянии.

Более современный подход – использование средств виртуализации и эмуляции реальных устройств. Для развёртывания базовой виртуальной сетевой инфраструктуры достаточно компьютеров со средними на сегодняшний день системными требованиями: 8–16 ГБ оперативной памяти, место на жёстком диске (лучше SSD) не менее 100 ГБ, 4–8-ядерный центральный процессор (x86 совместимый, поддерживающий виртуализацию, например Intel Core или AMD). Этого будет вполне достаточно для организации небольшой сети, в которой есть маршрутизатор, несколько коммутаторов и рабочих станций с установленными операционными системами Windows или GNU/Linux.

Одной сети, к тому же небольшой, не всегда достаточно для проведения исследований. Зачастую необходимо организовать несколько связанных друг с другом сетей, разбитых на зоны. Кроме того, серверы с работающими сетевыми службами и прикладными сервисами тоже могут потребовать больших вычислительных ресурсов для нормального функционирования. Таким образом, для более сложных сценариев уже потребуется производительный сервер виртуализации, чтобы серверам можно было выделить несколько процессорных ядер и достаточный объём оперативной памяти. Можно также воспользоваться услугами облачных провайдеров, взять в аренду необходимые вычислительные мощности и наращивать их объём в случае необходимости.

Отдельный вопрос, на который стоит обратить внимание, – наличие лицензии на использование официальных образов разворачиваемых систем (операционных, сетевых, прикладных). Речь идёт в основном об отечественных системах. Впрочем, там могут действовать определённые правила в рамках конкретного договора, особые условия для учебных заведений и т. д. Некоторые поставщики предлагают готовые решения и схемы развёртывания стендов для поддержки своих учебных курсов.

## **2. Киберполигоны**

Поскольку киберполигоны в основном используются для проведения комплексных исследований или соревнований с большим количеством участников, то здесь уже точно не обойтись без мощных серверных решений. И самый оправданный вариант – использование существующих предложений от крупных поставщиков сетевого оборудования или программных решений, поскольку вся проблема заключается в поддержке такого решения и быстрой адаптации инфраструктуры под нужды возрастающего количества участников.

В случае когда киберполигон небольшой, не предполагает масштабного развёртывания и служит в основном для поддержки лабораторных и практических работ конкретной учебной дисциплины или нескольких похожих дисциплин, лучше использовать термин «миникиберполигон». В литературе и статьях термин практически не используется, но зато его часто можно услышать в рамках презентаций учебными заведениями каких-то своих локальных решений.

Учитывая тот факт, что тенденция сегодняшнего дня – виртуализация и разворачивание в облаке, то и киберполигон, чтобы быть максимально доступным, тоже зачастую разворачивается в облаке. По сути, такой полигон становится распределённой системой с возможностью подключения к ней не только удалённых пользователей, но и некоторой пользовательской системы, развернутой на локальных пользовательских ресурсах. Если в качестве пользователя выступает целая организация, то виртуальная сеть киберполигона может быть существенно расширена, особенно учитывая, что таких пользователей может быть, вообще говоря, немало.

### 3. Учебно-лабораторная база

Лаборатории, киберполигоны и всевозможные комплексы в рамках учебного процесса можно охарактеризовать одним, более ёмким понятием – учебно-лабораторная база по реализации образовательных программ [1].

Такая база, помимо развития базовых навыков у студентов, отработки учебных задач по различным направлениям обучения в области информационных технологий и кибербезопасности, может использоваться в качестве оценочных средств определения уровня сформированности компетенций [2].

Элементы такой базы должны соответствовать современным реалиям и давать возможность опробовать различные сценарии настройки оборудования и программных средств, проведения тестирований на проникновение и оперативное реагирование.

Киберполигон предоставляет следующие обучающие возможности [3]:

- выполнение лабораторных работ для отработки практических навыков (как индивидуальных, так и командных);
- испытание теоретических знаний опытными экспериментами;
- тестирование студентов для оценки уровня знаний.

### 4. Общедоступный киберполигон

Поскольку собрать свой киберполигон в учебном заведении не всегда возможно ввиду ограничений, связанных с недоступностью достаточно производительного оборудования, серверов, систем виртуализации, часто прибегают к использованию доступных, готовых решений и предложений от крупных компаний. Это профессиональные, комплексные системы, предоставляющие в том числе и профессиональное программное обеспечение для управления информацией и событиями безопасности (SIEM), настройки межсетевых экранов нового поколения (NGFW), для анализа сетевого трафика и обнаружения заражённых узлов и нарушений политик безопасности (NTA/NDR) и других систем (EDR, XDR, ISIM, Sandbox...).

Среди отечественных предложений можно выделить:

- **Национальный киберполигон** от Ростелеком для отработки практических навыков по кибербезопасности [4]. Здесь развёрнуты типовые инфраструктур-

туры из различных отраслей (энергетика, нефтегазовый сектор, финансы, телеком). На момент написания статьи было доступно 7 отраслевых сегментов. Возможно построение киберполигонов на базе инфраструктуры заказчика, создание цифровых двойников сегментов. Рассчитан главным образом на подготовку специалистов конкретных предприятий.

- Киберполигон на базе решения **Ampire** в рамках консорциума «Цифровые технологии» (совместная экспозиция КНИТУ и Softline) [5]. Предоставляет специализированные программные системы для анализа следов злоумышленника и обнаружения атак, а также защиты информации. Подходит для обучения школьников и студентов, планирующих работать в сфере кибербезопасности. Используя шаблоны, можно моделировать типовые информационные системы и обрабатывать базовые сценарии.
- **Киберполигон Standoff 365** от Positive Technologies [6]. На базе полигона воссоздаются технологические и бизнес-процессы реальных компаний для исследования информационной инфраструктуры энергетических, финансовых компаний и корпоративных систем. На базе платформы проходят различные киберучения, соревнования и митапы.

Можно заметить, что киберполигон – это не просто стенд как набор технологий для развёртывания сетевой инфраструктуры. Это целый комплекс, выходящий на прикладной, проблемный уровень с готовыми схемами, шаблонами и сценариями, обобщающими практический опыт работы и исследований всевозможных случаев, подпадающих под сферу кибербезопасности, от социальной инженерии до защиты сетевого периметра.

Всё это примеры профессиональных решений. Существуют также частные решения, которые могут представлять интерес для тех, кто отважится развернуть полигон в лаборатории своего учебного заведения.

## 5. Частные полигоны учебных заведений

На прошедшем не так давно методическом семинаре «Вопросы преподавания и учебно-методического обеспечения реализации образовательного процесса по специальностям и направлениям подготовки в области информационной безопасности» (15 ноября 2023 г., СибГУТИ), был представлен ряд интересных решений: Миникиберполигон ЯрГУ и Кибергород на базе КГУ. Далее будет представлен небольшой обзор данных решений.

### Миникиберполигон ЯрГУ

В рамках семинара проект был представлен Д.М. Муриным (Демидовский университет). Поскольку проект динамичный и детали реализации естественным образом могут меняться, то далее представлена общая идея и главным образом описание доступного для реализации программного и аппаратного обеспечения.

Стоит отметить, что данный проект поддержан грантом Потанина. Что доказывает необходимость построения таких систем и их актуальность.

Для реализации полигона используются серверы виртуализации SuperMicro и программно-аппаратный шлюз безопасности ViPNet.

Полный список средств:

- Средства криптографической защиты информации: ViPNet Администратор, ViPNet Координаторы, ViPNet Клиенты.
- Межсетевые экраны и средства обнаружения вторжений: Рубикон;
- Средства доверенной загрузки: Соболь, Аккорд;
- Системы активной защиты: Касперский, Dr. Web;
- Средства защиты информации от несанкционированного доступа: Dallas Lock, Secret Net;
- Аппаратный идентификатор: RuToken;
- Средства анализа защищённости: Xspider, MaxPatrol 8;
- Межсетевой экран для защиты веб-приложений: PT Application Firewall;
- Средства управления событиями безопасности: MaxPatrol SIEM, SIEM Коград.

Аппаратно киберполигон поддерживается следующим оборудованием. Это 16 автоматизированных рабочих мест:

- 4 ядра / 8 потоков процессоры Intel i5;
- 32 ГБ оперативной памяти;
- 512 ГБ SSD;
- 2 ТБ жесткие диски.

На каждом рабочем месте установлено программное обеспечение:

- VMware Workstation Player или аналог;
- Виртуальная машина среды PNetLab (аналог EVE-NG);
- Клиент TightVNC.

Сервер (или комплекс серверов):

- 16-поточный процессор Intel;
- 256 ГБ оперативной памяти;

- 2 x 4 ТБ жесткие диски.

На сервере развёрнуты:

- 4 среды PNetLab (аналог EVE-NG);
- TightVNC (для трансляции рабочего стола преподавателя).

Помимо использования киберполигона в учебном классе, поддерживается дистанционное подключение, что немало важно в современных реалиях.

### **Кибергород на базе КГУ**

В рамках семинара проект был представлен Л.С. Крыжевичем (Курский государственный университет). С проектом можно более подробно ознакомиться в работе [7].

Цель проекта – добавить интерактивности в мероприятия типа хакатонов и СТГ и создать макет кибергорода. Не просто поставить проблему, а развернуть сценарий прямо на глазах у присутствующих. Создать эффект погружения.

Каждый объект имитируемого города базируется на технологиях Интернета вещей. Объектами можно управлять удалённо и интегрировать в общую цифровую экосистему.

Город представлен в виде трёхмерных моделей. Можно крушить, ломать, устраивать всевозможные ситуации (в том числе хакерские нападения), которые влияют на функционирование цифровой инфраструктуры и требуют немедленного реагирования.

## **6. Идея реализации киберполигона на базе хакерспейса**

### **Проект «Академический хакерспейс»**

Согласно данным ресурса Techopedia [8], хакерспейс – это:

- Место либо возможность (facility), т. е. предполагается как физическое (чаще), так и виртуальное присутствие и развёртывание;
- Место, где люди со схожими интересами работают над какими-то проектами, делятся знаниями, обсуждают и обкатывают идеи. Заводят полезные связи;
- Сообщество (community), в котором можно найти единомышленников.

Другие названия хакерспейса: опытная лаборатория (hacklab), изобретательский кружок (makerspace), хакерская тусовка (hackspace). Вольный перевод неустоявшихся терминов. Есть ещё понятие «фаблаб (fablab)» – мастерская.

В рамках проекта «Академический хакерспейс» [9] предлагаются следующие активности:

- Анализ и изучение имеющегося опыта (архитектуры микроконтроллеров, микропроцессоров, цифровой электроники и схемотехники, особенностей компонентных соединений, устройств, механизмов, интересных программных решений);
- Выявление возможностей (что можно сделать, из чего, для чего, как и как сделать ещё хитрее и ловче);
- Объяснение того, что происходит «за кадром» видимого и наблюдаемого (исходный код – машинная программа, идея – физические ограничения);
- Разработка идеологии хакерспейса как искусства инженерного мастерства. Методология, философия, социальное проявление.

Проект находится в самом начале своего зарождения, в фазе формирования идеи, высказывания и заявления о своём намерении, приурочен к году педагога и наставника, предполагает планомерное развитие. Пока предполагается, что проект будет функционировать в информационном пространстве, а сам хакерспейс будет разворачиваться виртуально. Формы, границы и правила находятся в процессе формирования и развития самой идеологии академического хакерспейса.

### **Миникиберполигон на базе хакерспейса**

Хакерспейс можно рассматривать как базу с доступным инструментом, аппаратными и программными ресурсами. Если хакерспейс функционирует как фаблаб (небольшая мастерская, предоставляющая возможность изготовления необходимых изделий), то, скорее всего, это физически доступная база, на которой из компонентов можно собрать функциональное устройство, как вариант – модифицировать существующее.

Такая форма может быть использована для направления кибербезопасности, связанного с созданием устройств для тестов на проникновение. Речь идёт об устройствах Интернета вещей. Проникновение можно осуществлять не только за периметр предприятия, но и в частную сеть пользователя или просто на персональное устройство. Сегодня на рынке можно найти множество программируемых электронных устройств и компонентов для реализации подобных решений сетевой направленности [10]. Отлично, если в таком хакерспейсе имеется достаточно сетевого и серверного оборудования для имитации информационной инфраструктуры хотя бы небольшого офиса. Тогда можно проводить живые мероприятия с разбором сценариев атак, сооружением средств защиты и нападения.

Если же на базе хакерспейса реально организовать виртуальное пространство, то можно развернуть на базе имеющегося оборудования виртуализации киберполигон, доступный в том числе и извне.

Интересный сценарий – «киберполигон как крепость», которую можно атаковать снаружи. Допустим, развёрнут киберполигон. Настроены каналы доступа для участников к «воротам крепости». Нужно найти уязвимости и проникнуть за черту сетевого периметра, вывести систему из строя (отключить важные службы или сделать их работу недоступной для внешних пользователей).



Если хакерспейс функционирует на базе учебного заведения, то в его рамках студенты разных курсов и направлений подготовки могут общаться, делиться опытом и разрабатывать совместные проекты, что вполне соответствует духу проектного обучения, которое сейчас активно внедряется в учебные заведения как важная часть профессионального становления студентов.

## 7. Заключение

В статье был проведён анализ учебно-лабораторной базы, соответствующей потребностям обучения специалистов в области безопасности компьютерных сетей и телекоммуникаций. Представлены отличия лабораторных стендов и киберполигонов. Предложен вариант реализации киберполигона на базе хакерспейса.

## Литература

1. Дружин О.В. [и др.] Научно-методологические подходы, принципы формирования учебно-лабораторной базы (киберполигонов, комплексов, лабораторий, учебно-тренировочных средств) по реализации образовательных программ в области информационной безопасности // Информационное противодействие угрозам терроризма. 2015. Т. 1, № 25. С. 150–153.
2. Монахов М.Ю., Тельный А.В., Мишин Д.В. О возможностях использования киберполигонов в качестве оценочных средств определения уровня сформированности компетенций // Информационное противодействие угрозам терроризма. 2015. Т. 1, № 25. С. 269–277.
3. Киреева Н.В. Особенности киберполигона как обучающей системы при подготовке специалистов по информационной безопасности // Актуальные проблемы высшего образования в области инфокоммуникационных технологий. 2023. С. 94.
4. КИБЕРМИР – Национальный киберполигон. URL: <https://cybermir.ru/> (дата обращения: 20.11.2023).
5. Учебно-тренировочная платформа для обучения методам обнаружения, анализа и устранения последствий компьютерных атак. URL: <https://softline.ru/solutions/security/kiberpoligon-ampire> (дата обращения: 20.11.2023).
6. Киберполигон. URL: <https://range.standoff365.com/> (дата обращения: 20.11.2023).
7. Крыжевич Л.С., Бабкин Г.В. Имитационная модель безопасного цифрового взаимодействия «Кибергород 2.0» // Фундаментальные проблемы информационной безопасности в условиях цифровой трансформации. 2019. С. 122–132.
8. What is Hackerspace? – Definition from Techopedia. URL: <https://www.techopedia.com/definition/29567/hackerspace> (дата обращения: 20.11.2023).
9. Академический хакерспейс // Academic Hackerspace. Stepik. URL: <https://stepik.org/course/180116> (дата обращения: 20.11.2023).
10. Гусс С.В. Гетерогенные сети с ячеистой топологией: технологии, моделирование, прототипирование сетевых устройств // Математические структуры и моделирование. 2023. № 3 (67). С. 71–87.

**FROM A LABORATORY BENCH FOR STUDYING THE BASICS OF COMPUTER NETWORKS TO A HACKERSPACE FOR INVENTORS AND A COMPETITIVE CYBER TRAINING GROUND**

**S.V. Guss**

Assistant Professor, e-mail: sviat@v-guss.ru

Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia

**Abstract.** The article discusses the problem of transition from a traditional laboratory stand for studying the basics of computer networks to a project hackerspace for inventors and a competitive cyber training ground for holding various events: hackathons, championships. Specific examples of software and hardware for configuring and deploying equipment are discussed.

**Keywords:** stand, hackerspace, cyber ranges.

*Дата поступления в редакцию: 20.11.2023*

## **ФОРМИРОВАНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ НАВЫКОВ СТУДЕНТОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «АНАЛИЗ УЯЗВИМОСТЕЙ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ»**

**Д.Э. Вильховский**

старший преподаватель, e-mail: vilkhovskiy@gmail.com

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

**Аннотация.** Представлен обзор методики преподавания дисциплины «Анализ уязвимостей программного обеспечения», позволяющей не только обеспечить теоретическую подготовку будущих специалистов по защите информации, но и сформировать практические навыки обнаружения и анализа уязвимостей, а также внести вклад в формирование общепрофессиональной компетенции специалистов по компьютерной безопасности ОПК-2.

**Ключевые слова:** компьютерная безопасность, информационная безопасность, уязвимости программного обеспечения, обнаружение уязвимостей, bWAPP, Burp Suite.

### **Введение**

Одной из общепрофессиональных компетенций выпускников специальности 10.05.01 «Компьютерная безопасность» является способность применять программные средства системного и прикладного назначения, в том числе отечественного производства, для решения задач профессиональной деятельности (компетенция ОПК-2) [1].

В качестве формирующих данную компетенцию дисциплин может быть выбрана дисциплина «Анализ уязвимостей программного обеспечения», в рамках которой целесообразно не только обеспечивать теоретическую подготовку по номенклатуре, составу уязвимостей, но и проводить обучение по использованию различных отраслевых инструментов для выявления и устранения уязвимостей. Методика преподавания данной дисциплины должна быть основана на восхождении от простейшего к сложному, так как именно такой подход позволяет студентам сформировать устойчивые знания, не допуская возникновения хаоса.

Кроме того, при преподавании дисциплины необходимо применять практикоориентированный подход. В отношении дисциплины «Анализ уязвимостей программного обеспечения» практикоориентированный подход предполагает получение студентами практических навыков работы с уязвимостями, т. е. не только знать в теории, какие типы уязвимостей и угроз существуют, но и научиться обнаруживать их, тем самым понимать возможную логику лиц, осуществляющих атаки. Кроме того, и что особенно важно, получение практических навыков работы по обна-

ружению уязвимостей способствует пониманию того, каким образом необходимо выстраивать безопасность программного обеспечения.

В качестве первичных инструментов, позволяющих студентам, обучающимся по специальности «Компьютерная безопасность», получить практическое представление об основных угрозах безопасности информации и уязвимостях программного обеспечения являются такие инструменты, как Burp Suite, а также специально созданное небезопасное веб-приложение bWAPP.

## 1. Изучение подмены запросов средствами Burp Suite

В настоящее время одной из самых распространенных и при этом самых простых атак является подмена запросов. В частности, это может быть подбор паролей для обхода защиты в виде аутентификации и входение в личный кабинет пользователя.

Отличным инструментом, позволяющим протестировать механизм осуществления подмены запросов, является платформа Burp Suite, позволяющая осуществлять тестирование на проникновение по различным направлениям, включая подмену запросов как уязвимости системы аутентификации к подбору паролей.

Перед тем как работать в программе, студентам рекомендуется обратиться к тьюториалу по использованию функционала программы (закладка Learn). Нажав на Start here, студент переходит на страницу, обучающую работе с программой, где подробно расписан общий функционал программы, включая модуль перехвата запросов и способы их модификации, а также различные инструменты.

### 1.1. Методология изучения подмены запросов средствами Burp Suite

С методической точки зрения следует отметить, что при изучении любой дисциплины степень усвоения материала студентом зависит от степени его вовлечённости и заинтересованности. В свою очередь, на вовлечённость и заинтересованность оказывает большое влияние практическая составляющая, а также соответствие предложенного к изучению инструментария актуальным проблемам современного мира. Причём даже не на профессиональном уровне (по сути, уровне каких-то пока ещё отдалённых информационных систем), а именно с точки зрения практической применимости в повседневной жизни – когда можно протестировать работу этого инструмента на том объекте, который интересен студенту в данный момент.

Таким образом, на первоначальном этапе освоения функционала Burp Suite являются его возможности в отношении подбора пароля, а следовательно, наиболее интересными для студентов здесь являются следующие инструменты:

- Proxu – модуль, позволяющий пользователю перехватывать запросы браузера, получая тем самым контроль над ними и проведением атак;
- Intruder – модуль, позволяющий перебирать параметры запроса и формировать атаки, после чего запускать их в автоматическом режиме.

Для получения доступа к запросам и, соответственно, возможности работы с подменами запросов нужно открыть вкладку Proxu и включить Перехватчик запро-

сов (режим Intercept is on). После студентам предлагается открыть браузер (нажимаем Open Browser) и ознакомиться с параметрами запросов, в том числе и с точки зрения того, с какими конкретно параметрами целесообразно работать далее в каждом конкретном запросе. А также базово ознакомиться с целевыми действиями, которые можно выполнить по каждому запросу:

- работать непосредственно в этом окне, отредактировав значения одного из / нескольких / всех параметров проведения атаки вручную, после чего переправлять запрос от браузера, нажав Forward;
- инициировать отказ браузера в отправлении запроса, нажав Drop;
- выполнить определённое целевое действие, нажав на Action – отправить запрос в Intruder, Repeater, Sequencer, Comparer, Decoder или Organizer.

Для изучения методов формирования автоматизированных атак студентам предлагается опробовать один из запросов в Intruder (применится команда Send to в Intruder). При этом важно обратить внимание студентов, что для получения наилучшего эффекта следует выбирать такие запросы, в которых было бы достаточно большое количество параметров. Практика показывает, что именно изучение функционала инструмента Intruder вызывает у студентов максимальную вовлечённость.

При этом, предлагая к изучению функционала инструмента Intruder, также методически верным является учёт следующих аспектов.

1. Изучение каждого из четырех доступных режимов формирования атак необходимо производить последовательно, от простого к сложному (и самому интересному, открывающему множество возможностей):
  - Sniper – заданные подменяющие параметры (Payload) поочередно и последовательно подставляются только в один из выбранных для атаки параметров, пытаясь точно пробить этот параметр;
  - Battering ram – заданные подменяющие параметры (Payload) поочередно и последовательно подставляются во все выбранные для атаки параметры;
  - Pitchfork – набор подменяющих параметров (Payload) задаётся для каждого из выбранных для атаки параметров, после чего они применяются соответственно порядковому номеру атаки;
  - Cluster bomb – набор подменяющих параметров (Payload) может быть задан для каждого из выбранных для атаки параметров, после чего для каждого подменяемого параметра поочередно подставляются все подменяющие параметры, заданные для этого запроса в целом, т. е. подменяющие параметры, задаваемые не только для этого конкретного подменяемого параметра, но и для других параметров также.
2. По каждому из режимов необходимо обращать внимание студентов на количество создаваемых вариантов нагрузок и запросов (соответственно, Payload count и Request count), а также на ключевые особенности каждого из режимов.

Например, в качестве таких особенностей можно выделить следующие:

- По режиму *Sniper*. Всегда изменяется всегда только 1 параметр, а количество сформированных запросов определяется как количество подменяющих параметров (*Payload*), возведенное в степень количество подменяемых параметров;
- По режиму *Buttering ram*. Первый раз в данном режиме запрос отправляется с неизменёнными параметрами, а затем каждый из заданных подменяющих параметров подставляется во все выбранные для изменения параметры;
- По режиму *Pitchfork*. Для первой атаки для каждого из изменяемых параметров возьмёт первый из соответственно заданного набора подменяющих параметров, для второго – второй и так далее. Таким образом, количество атак обусловлено минимальным количеством подменяющих параметров среди всех подменяемых параметров. То есть если при выборе трёх параметров для атаки для первого параметра задать набор из четырёх подменяющих параметров, а для второго – набор из двух, а для третьего – набор из трёх подменяющих параметров, то количество сформированных атак будет равняться двум;
- По режиму *Cluster bomb*. Режим полного перебора, позволяет не вручную указывать подменяющие значения, а задавать их, используя один из предложенных типов нагрузки (*Payload type*).

Одним из широко используемых задаваемых типов нагрузки является тип *Brute forcer* (режим полного автоматического перебора). Здесь в наборе подменяющих параметров (*Character set*) задаётся набор символов, из списка которых будет осуществляться перебор. В *Min length* и *Max length*, соответственно, задаётся минимальная и максимальная длина значения подменяющего параметра.

Соответственно, количество сгенерированных подменяющих параметров (Счётчик нагрузок) и количество сформированных атак (Счётчик запросов) может быть огромен.

Например, если для двух подменяемых параметров задать 4 значения вручную, а для третьего – выбрать тип *Brute forcer*, и в типе данных задать все цифры от 0 до 9 и все буквы латинского алфавита, указав минимальную и максимальную длину 4, то счётчики нагрузок и запросов будут, соответственно, равны 1 679 616 и 26 873 856. То есть будет в общей сложности проведено почти 27 миллионов атак.

Если оставить значения, заданные вручную, только для одного из параметров, а для двух оставшихся задать *Brute forcer* с указанным выше набором значений для перебора, то количество запросов (подмен) составит уже более 1,5 миллиардов;

- По всем режимам. Работают со всеми типами данных; понять, была ли атака успешной, можно по коду статуса (*Status code*).

## **2. Ознакомление с инструментами обучения работе с уязвимостями, доступными на платформе GitHub**

После изучения достаточно простого, но, как показывает практика, очень интересного студентам материала по подмене запросов следует начать углубляться в изучаемую дисциплину.

Для этого рекомендуется обратиться к инструментам обучения по работе с уязвимостями, доступными на платформе GitHub [2]. На платформе собран большой и всеобъемлющий перечень подобных инструментов в разделе *Awesome Vulnerable Applications*, посвящённом приложениям с уязвимостями.

В качестве знаний, необходимых для работы с данной платформой, можно выделить в первую очередь необходимость знания английского языка, так как вся информация, содержащаяся на платформе, представлена именно на английском языке. С одной стороны, обращение к англоязычным ресурсам позволит развить междисциплинарные навыки, в данном случае обуславливая необходимость глубокого изучения английского языка, владение которым является в наши дни практически необходимым навыком для инженеров-программистов и специалистов по защите информации. С другой стороны, возможность работы с материалом, представленным на платформе, доступна даже для тех студентов, уровень владения английским языком которых невысок – достаточно в браузере запустить команду «Перевести на русский язык». Конечно, в некоторой степени возможны определённые ограничения в связи с особенностями лексики или же не всегда корректной работы встроенного переводчика (алгоритмы которого, к слову, постоянно совершенствуются и уже сейчас находятся на достаточно высоком уровне, зачастую близком к человеческому переводу).

Итак, дадим краткую характеристику раздела *Awesome Vulnerable Applications* платформы GitHub. Во-первых, здесь собран большой набор различных уязвимостей, а также большой объем теоретической информации по уязвимостям, включая не только OWASP top 10 уязвимостей для веб-приложений, но и уязвимости виртуальных машин. Таким образом, студентам рекомендуется сперва изучить теоретические основы существующих уязвимостей.

Во-вторых, в разделе *Awesome Vulnerable Applications* собраны ссылки на различные онлайн-сервисы, позволяющие потренироваться в нахождении уязвимостей. Студентам рекомендуется изучить материалы, представленные в данном разделе, и поработать с полезными инструментами, позволяющими глубоко усвоить материал и прокачать навыки по информационной безопасности.

В качестве наиболее интересных в наших целях подразделов здесь можно выделить следующие:

- OWASP Top 10 – раздел, посвящённый безопасности веб-приложений, в котором содержится множество веб-приложений со встроенными уязвимостями и лабораторий для пентестов;
- Cloud Security – раздел, посвящённый облачной безопасности, в собранном перечне которого есть в том числе Kubernetes и AWS инфраструктуры со встроенными уязвимостями;

- Mobile Security – раздел, посвящённый безопасности мобильных приложений;
- Vulnerable VMs – раздел, посвящённый уязвимостям в виртуальных машинах;
- тематические разделы, посвящённые SQL-, XSS- и XXE-инъекциям, подделке запросов на стороне сервера и контрабанды запросов, а также проблемам неправильной конфигурации CORS.

В целом можно сказать, что раздел Awesome Vulnerable Applications с методической точки зрения выстроен достаточно хорошо: по каждому инструменту даётся краткая характеристика, на основании которой можно получить представление о том, какие задачи решает данный инструмент и какие навыки позволяет сформировать. Также наименование каждого инструмента выполнено в виде гиперссылки, ведущей на ветку, посвящённую исключительно данному инструменту. При этом в описании инструмента, содержащегося непосредственно в посвящённой ему ветке, достаточно подробно указывается, какие уязвимости содержит данный инструмент. Это позволяет студентам при минимальных временных затратах получить максимум информации о том, насколько данный инструмент интересен им для решения поставленных перед ними задач, например, в рамках самостоятельной работы, и, конечно же, исследовать различные небезопасные приложения и облачные инфраструктуры и др. То есть сформировать практические навыки поиска и анализа уязвимостей.

### **3. Формирование у студентов практических навыков обнаружения уязвимостей веб-приложений на примере небезопасного веб-приложения bWAAP**

Формирование у студентов практических навыков обнаружения уязвимостей веб-приложений является ещё одной практикоориентированной составляющей предложенной методики преподавания дисциплины «Анализ уязвимостей программного обеспечения». С этой точки зрения наиболее полезным является раздел OWASP Top 10, посвящённый именно уязвимостям в веб-приложениях.

Среди небезопасных веб-приложений, представленных в данном подразделе, на наш взгляд, особую ценность с точки зрения формирования у студентов практических навыков обнаружения уязвимостей в веб-приложениях представляет приложение bWAPP.

bWAPP является достаточно старым приложением (последний коммент на GitHub от декабря 21 года). Однако его ценность состоит в том, что с его помощью можно прицельно и максимально полно изучать отдельные уязвимости, в том числе и в их различных вариациях. С точки зрения методики обособление каждого типа уязвимостей и прицельная работа с какой-либо из них является особенно полезной, когда студент находится только в начале пути освоения основ информационной безопасности. По сути, это дидактическая единица, освоить которую необходимо прежде, чем попасть в реалии нескольких одновременно существующих дидактических единиц, или, что ещё более вероятно, реалии проведения тестов на проникновение,



реалии полной неопределённости, когда заранее неизвестно, какая уязвимость существует и каким образом она может быть отработана (тип атаки).

По работе с приложением bWAPP разработана очень подробная инструкция, её можно легко найти, вбив в строку поиска запросы типа «bWAPP tutorial» или же «bWAPP examples». В инструкции в содержании указаны все уязвимости, существующие в этом небезопасном приложении.

При этом в разделе, посвящённом отдельному типу уязвимостей, даётся пример её воспроизведения в уже известной нам программе Burp Suite, со скриншотами. Таким образом, студенты могут научиться воспроизводить предлагаемый способ атаки на данную уязвимость, т. е. осуществлять поиск уязвимости данного типа и её последующий анализ.

Что касается непосредственно работы с самим приложением bWAPP, в приложении есть выпадающий список, где можно выбрать уязвимость, навыки обнаружения и атаки на которую студент желает сформировать.

Отметим, что приложение содержит в общей сложности около 100 уязвимостей разного рода (наиболее распространённые уязвимости из OWASP Top 10), каждую из которых можно воспроизвести прицельно.

#### **4. Заключение**

Таким образом, предлагаемая методика преподавания дисциплины «Анализ уязвимостей программного обеспечения» представляет собой трёхступенчатую последовательность формирования у студентов практических навыков работы с уязвимостями.

1. Изучение подмены запросов средствами Burp Suite, позволяющее начать изучение уязвимостей с базовых вещей и сформировать у студентов общую вовлечённость в проблематику.
2. Ознакомление с инструментами обучения работе с уязвимостями, доступными на платформе GitHub, позволяющее получить достаточно полное представление о том, какие уязвимости существуют, особенности их жизнедеятельности в различных системах (веб- или мобильных приложениях, виртуальных машинах и облачных системах), а также сформировать вектор направления дальнейшей работы с уязвимостями в рамках как аудиторной, так и самостоятельной работы студентов.
3. Формирование у студентов практических навыков обнаружения уязвимостей веб-приложений на примере небезопасного веб-приложения bWAAP, позволяющее получить практические навыки обнаружения и анализа отдельных наиболее распространённых уязвимостей веб-приложений.

В качестве дальнейшего вектора самостоятельной работы студентов, желающих углубить свои навыки обнаружения уязвимостей в веб-приложениях, можно выделить работу с приложением OWASP Juice Shop. Это ещё одно приложение, специально созданное со многими уязвимостями, относящиеся,

в отличие от bWAPP, не к категории приложений, обучающих основам, а к категории приложений-челленджей.

## Литература

1. Приказ от 26 ноября 2020 г. № 1459 «Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования – специалитет по специальности 10.05.01 Компьютерная безопасность». URL: <https://fgos.ru/fgos/fgos-10-05-01-компьютерная-безопасность-1459/> (дата обращения: 28.11.2023).
2. Раздел Awesome Vulnerable Applications на платформе GitHub. URL: <https://github.com/vavkamil/awesome-vulnerable-apps> (дата обращения: 28.11.2023).

### DEVELOPING STUDENT PRACTICAL SKILLS BY THE SOFTWARE VULNERABILITY ANALYSIS COURSE

**D.E. Vilkhovsky**

Assistant Professor, e-mail: [vilkhovskiy@gmail.com](mailto:vilkhovskiy@gmail.com)

Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia

**Abstract.** The paper provides an overview of the methodology for teaching the discipline Software Vulnerability Analysis course methodology, which allows not only to provide future information security specialists with theory on the software vulnerability, but to develop their practical skills in detecting and analyzing these vulnerabilities, as well as contribute to their gaining general professional competence GPC-2.

**Keywords:** computer security, information security, software vulnerabilities, vulnerability detection, bWAPP, Burp Suite.

*Дата поступления в редакцию: 28.11.2023*

## Авторам

### Предоставляемые данные и документы

Автор предоставляет в редакцию:

- рукопись статьи в формате  $\text{\LaTeX}$  (см. требования к оформлению);
- список из трёх экспертов по тематике статьи, давших согласие написать рецензию на представленную работу<sup>1</sup>;
- экспертное заключение о возможности открытого опубликования.

### Лицензирование

Согласно ГК РФ ст. 1286 лицензионный договор с автором для публикации в периодических изданиях может быть заключён в устной форме. Сам факт получения рукописи статьи редколлегией журнала «Математические структуры и моделирование» является акцептом (принятием) лицензионного договора.

Все статьи в журнале «Математические структуры и моделирование» публикуются под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY). Текст лицензии находится по адресу <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>.

### Требования к оформлению рукописи

К публикации принимаются рукописи объёмом не более 16 страниц.

Авторам необходимо предоставить следующую информацию на русском и английском языках:

- название статьи;
- список авторов с указанием
  - фамилии, имени и отчества,
  - учёного звания,
  - учёной степени,
  - должности,
  - места работы или учёбы,
  - действующего адреса электронной почты;
- аннотация (абстракт) объёмом от 100 до 250 слов;
- список ключевых слов.

Автор также указывает УДК (универсальный десятичный код) статьи. Его можно подобрать по тематике статьи в справочнике <http://msm.univer.omsk.su/udc/>.

Библиографические ссылки оформляются согласно ГОСТ 7.0.5–2008.

Рукопись статьи представляется в редакцию по электронной почте в двух форматах pdf и tex. Статья должна быть набрана с использованием макропакета  $\text{\LaTeX}$ и стиля msmb.cls, предоставляемого редакцией <http://msm.univer.omsk.su/files/msmb.zip>. Рекомендуется установить компилятор  $\text{MiKTeX}$ , так как именно им пользуются в редакции.

Отклонения в оформлении рукописи от приведённых правил позволяют редколлегии принять решение о снятии статьи с публикации. Статья может быть отклонена по причинам несоответствия тематике журнала или в связи с низким уровнем качества научного исследования.

В статье запрещается переопределять стандартные команды и окружения.

Нумеруемые формулы необходимо выделять в отдельную строку.

Нумерация только арабскими цифрами в порядке возрастания с единицы. Нумеровать следует только те формулы, на которые в тексте имеются ссылки.

Запрещается использовать в формулах буквы русского алфавита. Если без них никак не обойтись, то следует использовать команду  $\text{\mbox{...}}$ .

<sup>1</sup>Необходимы полные данные экспертов (место работы, учёная степень, должность), с указанием способа связи с ними (e-mail, телефон). Редколлегия может обратиться к одному из экспертов из предложенного списка с просьбой написать рецензию или может назначить рецензента из собственного списка.

Все рисунки и таблицы должны иметь подпись, оформленную с помощью команды `\caption{...}`.

Файлы с рисунками необходимо представить в формате PDF или EPS (использовать редакторы векторной графики типа InkScape, Adobe Illustrator или Corel Draw).

Используйте стандартные команды переключения на готический, каллиграфический и ажурный шрифты: `\mathfrak`, `\mathcal` и `\mathbb`.

Не допускается заканчивать статью рисунком или таблицей.

В списке литературы обязательно указание следующих данных: для книг — фамилии и инициалы авторов, название книги, место издания, издательство, год издания, количество страниц; для статей — фамилии и инициалы авторов, название статьи, название журнала, год издания, том, номер (выпуск), страницы начала и конца статьи (для депонированных статей обязательно указать номер регистрации).

Кавычки в русском тексте («абвгд») должны быть угловыми, в английском — прямыми верхними кавычками ("abcdefg" или "abcdefg").

Обязательна расшифровка сокращений при первом вхождении термина. Например: ... искусственный интеллект (ИИ)...

## Порядок рецензирования

Первичная экспертиза проводится главным редактором (заместителем главного редактора). При первичной экспертизе оценивается соответствие статьи тематике журнала, правилам оформления и требованиям, установленным редакцией журнала к научным публикациям.

Все статьи, поступившие в редакцию научного журнала «Математические структуры и моделирование», проходят через институт рецензирования.

Рецензент выбирается главным редактором журнала из числа членов редколлегии или ведущих специалистов по профилю данной работы.

Рецензенты уведомляются о том, что присланные им рукописи являются частной собственностью авторов и относятся к сведениям, не подлежащим разглашению. Рецензентам не разрешается делать копии статей для своих нужд.

Срок для написания рецензии устанавливается по согласованию с рецензентом.

Рецензия должна раскрывать актуальность представленного материала, степень научной новизны исследования, определять соответствие предлагаемого к публикации текста общему профилю издания и стиль изложения.

Рецензент выносит заключение о возможности опубликования статьи: «рекомендуется», «рекомендуется с учётом исправления замечаний, отмеченных рецензентом» или «не рекомендуется». В случае отрицательной рецензии редакция направляет автору мотивированный отказ, заверенный главным редактором или его заместителем.

В случае несогласия с мнением рецензента автор статьи имеет право предоставить аргументированный ответ в редакцию журнала. Статья может быть направлена на повторное рецензирование, либо на согласование в редакционную коллегию.

При наличии в рецензии рекомендаций по исправлению и доработке статьи автору направляется текст рецензии с предложением учесть их при подготовке нового варианта статьи или аргументированно (частично или полностью) их опровергнуть. Доработанная (переработанная) автором статья повторно направляется на рецензирование и рассматривается в общем порядке. В этом случае датой поступления в редакцию считается дата возвращения доработанной статьи.

После принятия редколлекцией решения о допуске статьи к публикации автор информируется об этом и указываются сроки публикации.

Оригиналы рецензий хранятся в редакции в течение пяти лет.

## Авторская этика

Авторы публикаций должны гарантировать, что в список авторов включены только лица, соответствующие критериям авторства (лица, внёсшие значительный вклад в работу), и что заслуживающие авторства исследователи не исключены из списка авторов.

Должны работать вместе с редакторами или издателями для скорейшего исправления своих работ в случае обнаружения в них ошибок или упущений после публикации.

Обязаны незамедлительно уведомлять редакцию в случае обнаружения ошибки в любой поданной ими на публикацию, принятой для публикации или уже опубликованной работе.

Не вправе копировать из других публикаций ссылки на работы, с которыми они сами не ознакомились; цитаты и ссылки на другие работы должны быть точными и оформленными в соответствии с предъявляемыми требованиями.

Должны ссылаться максимально правильно и точно на имеющие отношение к публикации предыдущие работы как других исследователей, так и самих авторов, обращаясь, прежде всего к первоисточнику; дословное воспроизведение собственных работ и их перефразирование неприемлемы, они могут быть использованы лишь в качестве основы для новых выводов.

Необходимо указывать авторство данных, текста, рисунков и идей, которые автор получил из других источников — они не должны представляться, как принадлежащие автору публикации; прямые цитаты из работ других исследователей должны выделяться кавычками и соответствующей ссылкой.

Должны соблюдать нормы законодательства о защите авторских прав; материалы, защищённые авторским правом (например, таблицы, цифры или крупные цитаты), могут воспроизводиться только с разрешения их владельцев.

### **Памятка для перевода должностей, учёных степеней и званий на английский язык**

Профессор = Professor

Доцент = Associate Professor

Старший преподаватель = Assistant Professor

Преподаватель = Instructor

Ассистент = Instructor

Аспирант = Postgraduate Student или Ph.D. Student

Соискатель = Ph.D. Doctoral Candidate

Магистрант = Master's Degree Student

Студент = Student

д.ф.-м.н. = Dr.Sc. (Phys.-Math.)

к.ф.-м.н. = Ph.D. (Phys.-Math.)

д.т.н. = Dr.Sc. (Techn.)

к.т.н. = Ph.D. (Techn.)

Инженер-программист = Software Engineer

Старший/младший научный сотрудник = Senior/Junior Scientist Researcher

### **Электронная почта для отправки статей**

dmtree@ya.ru — зам. главного редактора (ответственный за выпуск) Д.Н. Лавров.

Научный журнал

# Математические структуры И моделирование

№ 4 (68)

Главный редактор  
**А.К. Гуц**

Зам. глав. ред., выпускающий редактор  
**Д.Н. Лавров**

Зам. глав. ред., технический редактор  
**Н.Ф. Богаченко**

Корректор:  
**Ф.А. Абдурашитова**

Перевод на английский язык в авторской редакции

---

**Адрес научной редакции**

644077, Омская обл., г. Омск, пр-т Мира, д. 55а,

Омский государственный университет

E-mail: [aguts@mail.ru](mailto:aguts@mail.ru), [dmtrl@ya.ru](mailto:dmtrl@ya.ru)

Электронная версия журнала:

<http://msm.omsu.ru>

<http://msm.univer.omsk.su>



---

Подписано в печать 20.12.2023 Формат 60 × 84 1/8.

Усл. печ. л. 16,39. Тираж 25 экз. Заказ № 385.

---

Отпечатано на полиграфической базе издательства ОмГУ им. Ф.М. Достоевского  
644077, Омская обл., г. Омск, пр-т Мира, д. 55а

ISSN 2222-8772



9 772222 877005



23068 >