

ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

12+



**БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ
«СУРГУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ
PROCEEDINGS IN CYBERNETICS**

Научный журнал

ТОМ 23, № 1

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**Сургут
2024**

Учредитель и издатель
Бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»

Главный редактор
Острейковский Владислав Алексеевич, д. т. н., профессор

Заместитель главного редактора
Тараканов Дмитрий Викторович, к. т. н., доцент

Ответственный секретарь
Брагинский Михаил Яковлевич, к. т. н., доцент

Члены редакционной коллегии:
Советов Б. Я., академик РАН и РАО, д. т. н., профессор
Юсупов Р. М., член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор
Абрамов О. В., д. т. н., профессор
Анохин А. Н., д. т. н., профессор
Антонов А. В., д. т. н., профессор
Бурханов Р. А., д. филос. н., профессор
Бушмелева К. И., д. т. н., профессор
Гетман А. Ф., д. т. н., профессор
Григорьев Л. И., д. т. н., профессор
Древс Ю. Г., д. т. н., профессор
Ельников А. В., д. ф.-м. н., профессор
Инютин С. А., д. т. н., профессор
Каштанов В. А., д. ф.-м. н., профессор
Керимов Т. Х., д. филос. н., профессор
Крамаров С. О., д. ф.-м. н., профессор
Леонов Д. Г., д. т. н., профессор
Малышев Д. С., д. ф.-м. н., профессор
Мельников А. В., д. т. н., профессор
Певзнер Л. Д., д. т. н., профессор
Увайсов С. У., д. т. н., профессор
Цибульский В. Р., д. т. н., профессор
Юрков Н. К., д. т. н., профессор

Выпускающий редактор

Хасанова А. Ш.

Редактор

Зелексон Л. А.

Верстка

Чорньенского С. И.

Переводчик

Петрова А. В.

Рисунок на обложке:

Визуализация магнитогидродинамических расчетов для точного решения внутри сферы
© Галкин В. А., Гореликов А. В.

Решением Высшей аттестационной комиссии с 29 мая 2017 года журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук». С 29.03.2022 издание принимает к публикации статьи по следующим научным специальностям: 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации; 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации средства массовой информации
Эл № ФС77-83015 от 31.03.2022.

Издается с 2002 года. Выпускается 4 раза в год.

Адрес редакции:

БУ ВО «Сургутский государственный университет»,
628412, Россия, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Сургут, пр. Ленина, 1
Тел.: +7 (3462) 76-29-88, факс: +7 (3462) 76-29-29, e-mail: proceed.cyber@mail.ru. Сайт: vestcyber.ru

Founder and Publisher
Surgut State University

Chief Editor

Prof. Vladislav A. Ostreikovskiy, Doctor of Sciences (Engineering)

Vice Chief Editor

Dmitry V. Tarakanov, Candidate of Sciences (Engineering), Docent

Executive Editor

Mikhail Ya. Braginsky, Candidate of Sciences (Engineering), Docent

Editorial Board:

Prof. Sovetov B. Ya., Doctor of Sciences (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS), the Russian Academy of Education (RAE)

Prof. Yusupov R. M., Doctor of Sciences (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS)

Prof. Abramov O. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Anokhin A. N., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Antonov A. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Burkhanov R. A., Doctor of Sciences (Philosophy)

Prof. Bushmeleva K. I., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Getman A. F., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Grigoryev L. I., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Drevs Yu. G., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Elnikov A. V., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Inyutin S. A., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Kashtanov V. A., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Kerimov T. Kh., Doctor of Sciences (Philosophy)

Prof. Kramarov S. O., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Leonov D. G., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Malyshev D. S., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Melnikov A. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Pevzner L. D., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Uvaisov S. U., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Tsibulsky V. R., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Yurkov N. K., Doctor of Sciences (Engineering)

Publishing Editor

Khasanova A. Sh.

Editor

Zelekson L. A.

Layout

Chornenkiy S. I.

Translator

Petrova A. V.

Cover Image:

A visualization of magnetohydrodynamic analysis used to find an exact solution within a sphere

© Galkin V. A., Gorelikov A. B.

Since 29.05.2017 the journal is included in the List of Leading Peer-Reviewed Scientific Journals of the Higher Attestation Commission, which publishes main scientific results of Doctor's and Candidate's theses.

Since March 29, 2022, the journal is included in the List on the following subject groups:

- 2.3.1. System Analysis, Data Management and Processing; 1.2.2. Mathematical Modeling, Calculus and Program Complexes;
2.2.2. Electronic Component Base of Micro- and Nanoelectronics, Quantum Devices.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media. Mass media registration certificate El No. FS77-83015 dated on 31.03.2022.

Published since 2002. 4 issues per year.

Editorial Board Address:

Surgut State University, Russia 628412, Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra, Surgut, Lenina pr., 1

Tel.: +7 (3462) 76-29-88, fax: +7 (3462) 76-29-29, e-mail: proceed.cyber@mail.ru. Web: vestcyber.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Алексеев М. М., Семенов О. Ю., Сысоев С. М., Фурукин Д. С.</i> Применение метода сейсмической инверсии для оценки физических параметров нефтегазоносных пластов	6
<i>Берестин Д. К., Хусаинов С. И.</i> Модель системы мониторинга положения позвоночника	17
<i>Брыкин В. В., Брагинский М. Я., Тараканов Д. В., Тараканова И. О.</i> Классификация состояния растений средствами текстурного вейвлет-анализа и машинного обучения	23
<i>Дубровина А. И., Акперов Т. И., Александрова Т. С.</i> Модель идентификации агрессивных программных элементов	31
<i>Курамшина А. В., Лысенкова С. А.</i> Алгоритм выявления факторов повышения эффективности деятельности предприятия сферы услуг	37
<i>Мальшева А. К., Абдуллаева А. М.</i> Выбор оптимального программного продукта для календарного планирования стратегии развития компании	47
<i>Носков С. И., Знайдюк А. Н.</i> Вычисление параметров простой формы вложенной кусочно-линейной регрессии методом смешанного оценивания	54
<i>Романовский М. В., Солдатов А. И.</i> Обработка акустических сигналов при несанкционированном воздействии на магистральный трубопровод	60
<i>Энгель Е. А., Энгель Н. Е.</i> Реализация интеллектуальной системы непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции как программы для ЭВМ	68

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Заводовский А. Г.</i> Зависимость поверхностного натяжения водного раствора хлорида натрия от концентрации и температуры	75
<i>Черемухин А. Д.</i> Оценка эффективности тестов гетероскедастичности	81

CONTENTS

ENGINEERING

<i>Alekseev M. M., Semenov O. Yu., Sysoev S. M., Furukin D. S.</i> Seismic inversion method for assessing the physical parameters of oil and gas reservoirs	6
<i>Berestin D. K., Khusainov S. I.</i> A model of a spine position monitoring system.....	17
<i>Brykin V. V., Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V., Tarakanova I. O.</i> Classification of plants health via texture wavelet analysis and machine learning	23
<i>Dubrovina A. I., Akperov T. I., Aleksandrova T. S.</i> A model detecting aggressive software elements	31
<i>Kuramshina A. V., Lysenkova S. A.</i> An algorithm for detecting factors of rise in the performance efficiency of a service-oriented enterprise.....	37
<i>Malysheva A. K., Abdullaeva A. M.</i> Selecting an effective software product for scheduling a strategic profile of a company	47
<i>Noskov S. I., Znaidyuk A. N.</i> Calculating parameters of a simple nested piecewise linear regression using mixed estimation	54
<i>Romanovsky M. V., Soldatov A. I.</i> Acoustic signals processing in unauthorized operation on the main pipeline	60
<i>Engel E. A., Engel N. E.</i> Implementing an intelligent system of indirect forecasting of solar power generation as computer software	68

PHYSICS AND MATHEMATICS

<i>Zavodovsky A. G.</i> Concentration and temperature dependency of the saline surface tension	75
<i>Cheremukhin A. D.</i> Evaluating effectiveness of tests for heteroscedasticity.....	81

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья
УДК 550.34:622.276
DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-1

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНВЕРСИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ПЛАСТОВ

*Максим Михайлович Алексеев¹, Олег Юрьевич Семенов²✉, Сергей Михайлович Сысоев³,
Дмитрий Сергеевич Фурукин⁴*

^{1, 2, 3, 4}*Сургутский государственный университет, Сургут, Россия*

¹*amm.iff@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8657-5803>*

²*phys7sou@mail.ru* ✉, *<https://orcid.org/0000-0002-3553-7356>*

³*smsysoev57@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5180-571X>*

⁴*ous.tutor.phinma@mail.ru*

Аннотация. Работа посвящена современному методу сейсмической инверсии. Проведена синтетическая привязка скважин для моделирования пространственного распределения импеданса. Построены низкочастотная фоновая модель и куб акустического импеданса, нормализованы данные плотностного и акустического каротажей. Выполнены анализ петроупругих свойств, динамический анализ и даны рекомендации на заложение бурения скважин. Используемый метод в равной мере учитывает геологическую информацию на основе структурной модели для сейсмических горизонтов.

Ключевые слова: сейсмическая инверсия, плотностной каротаж, куб акустического импеданса, синтетическая привязка, низкочастотная фоновая модель

Для цитирования: Алексеев М. М., Семенов О. Ю., Сысоев С. М., Фурукин Д. С. Применение метода сейсмической инверсии для оценки физических параметров нефтегазоносных пластов // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 1. С. 6–16. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-1.

Original article

SEISMIC INVERSION METHOD FOR ASSESSING THE PHYSICAL PARAMETERS OF OIL AND GAS RESERVOIRS

Maksim M. Alekseev¹, Oleg Yu. Semenov²✉, Sergey M. Sysoev³, Dmitry S. Furukin⁴

^{1, 2, 3, 4}*Surgut State University, Surgut, Russia*

¹*amm.iff@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8657-5803>*

²*phys7sou@mail.ru* ✉, *<https://orcid.org/0000-0002-3553-7356>*

³*smsysoev57@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5180-571X>*

⁴*ous.tutor.phinma@mail.ru*

Abstract. The article is devoted to a modern seismic inversion model. The spatial distribution of impedance is simulated using a synthetic well tie. A low-frequency background model is built as well as an acoustic impedance cube. Density and sonic log data are balanced. The study conducted both an analysis of petroelastic properties and a dynamic analysis. Guidelines for drilling locations are given. The method used takes into account the geological data based on a structural model for seismic horizons.

Keywords: seismic inversion, density log, acoustic impedance cube, synthetic tie, low-frequency background model

For citation: Alekseev M. M., Semenov O. Yu., Sysoev S. M., Furukin D. S. Seismic inversion method for assessing the physical parameters of oil and gas reservoirs. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(1): 6–16. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-1.

ВВЕДЕНИЕ

В геофизике применяется несколько методов изучения структуры Земли, поиска месторождений полезных ископаемых и оценки запасов углеводородов. Рассмотрим использование этих методов для оценки физических параметров нефтегазоносных пластов, включая их проницаемость, пористость и насыщение флюидами с помощью математических алгоритмов обращения сейсмических данных, полученных в результате проведения сейсморазведочных работ и моделирования. Сейсмическая инверсия – это процесс обращения сейсмических данных для получения информации о структуре и свойствах геологической среды. Плотностной каротаж – это метод изучения геологических разрезов скважин, основанный на измерении плотности горных пород, он позволяет определить литологии пород, их коллекторские свойства и другие характеристики, необходимые для оценки запасов углеводородов и выбора методов их разработки [1–4].

Применение метода сейсмической инверсии включает следующие этапы:

- запись и обработка сейсмических данных, на этом этапе проводится сбор и обработка информации при помощи специализированного оборудования;

- создание моделей пласта, на основе сейсмических данных строится трехмерная модель пласта, которая включает информацию о его структуре, свойствах и насыщенности флюидами;

- применение метода инверсии, математический алгоритм используют для получения оценок физических параметров модели пласта;

- валидация результатов, полученные оценки физических параметров проверяются на соответствие геологическим и геофизическим данным испытаний скважин;

- корректировка модели и повторение процесса, на основе валидации результатов могут

быть внесены корректировки в модель пласта и процесс инверсии.

Добыча нефти, газа и других полезных ископаемых из земных недр является сложным технологическим процессом, в который входят процесс определения местоположения углеводородов и привязка скважины. Результаты бурения последних лет говорят о необходимости детализации геологического строения залежей пластов неокомской группы. С целью решения данной задачи планируется выполнить оценку физических параметров пластов неокомской группы и уточнить корреляцию отражающих горизонтов, относящихся к данным пластам, методом сейсмической инверсии данных общей глубинной точки. Заложение скважины – это процесс выбора места для бурения скважины. Он включает в себя определение координат места скважины, глубины, угла наклона и других параметров, необходимых для успешного бурения. Рекомендации по заложению скважин включают информацию о геологических особенностях района, наличии полезных ископаемых и других факторах, которые могут повлиять на процесс бурения [5–8].

Определимся с терминологией метода сейсмической инверсии. Синтетическая привязка – это метод создания виртуальных точек наблюдения в трехмерном пространстве на основе имеющихся данных. Низкочастотная фоновая модель необходима для описания распределения акустического импеданса на низких частотах и учета влияния окружающей среды на распространение звука. Акустический каротаж – метод изучения свойств пород путем измерения скорости распространения и затухания акустических волн. Акустический импеданс характеризует способность материала отражать или проводить звук. Для этого метода используются данные о скорости звука в материале и его плотности. Куб акустического импеданса – это трехмерная модель, которая показывает

распределение акустического импеданса в пространстве [9–12].

Результатом статьи является создание сейсмогеологической модели пластов неоконской группы и определение объектов для бурения новых скважин, уточнение модели строения пластов с применением данных сейсмической инверсии. Для визуализации модели нефтегазового месторождения применялся программный комплекс Petrel [13].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Математические алгоритмы, которые оптимизируют параметры модели среды, позволяют проверить и достигнуть наилучшего соответствия между моделированными и измеренными акустическими данными. Детерминистическая акустическая инверсия – метод, используемый в геофизике для анализа акустических данных, определения структуры и свойств земных слоев. Она основана на решении обратной задачи, где измеренные акустические данные используются для определения параметров среды, через которую распространяется звуковая волна. Этот метод позволяет получить наиболее точные сведения о среде, соответствующие зарегистрированным данным с помощью сопоставления модельных и измеренных акустических параметров и последующей оптимизации модели.

Детерминистическая инверсия представляет собой инструмент исследования подземных структур и широко применяется в нефтегазовой промышленности, геологии, геофизике и других областях, где важно понимание геологической среды. Она обеспечивает детальную информацию о слоях Земли и позволяет прогнозировать структурный и литологический состав подземных областей. Анализ прослеженных отражающих горизонтов, динамических атрибутов на основе куба акустического импеданса позволит узнать о наличии углеводородов в интервале неоконской и дать рекомендацию на заложение бурения скважин.

Главная цель инверсии – определение этих параметров среды на основе акустических параметров, полученных в результате сейсми-

ческого исследования. В детерминистической акустической инверсии важным аспектом является использование различных источников акустических волн, таких как взрывы, геофоны или звуковые источники на поверхности земли и морском дне. Каждый источник имеет свои особенности и применяется в зависимости от требуемого разрешения и глубины исследования. Также детерминистическая инверсия может быть комбинирована с другими методами исследования, такими как электромагнитные методы или гравиметрия, с целью получения более полной информации о геологической среде.

В работе использовался метод обобщенной линейной инверсии для оптимизации значений акустических импедансов (I_p) в горизонтальных пластах с фиксированными границами раздела. Это достигалось путем минимизации функционала, который контролировал расхождение между модельной ($m(t)$) и реальной ($s(t)$) трассами, а также удаление от заданного начального приближения. Основное внимание уделялось линеаризации разности модельных трасс ($\Delta m(t)$) относительно небольших вариаций (ΔI_p) акустических параметров модели. Однако недостатком этого метода пластовой инверсии было точное задание априорной информации о свойствах разреза, включая фиксацию значений I_p отдельных пластов, что ограничивало его применимость в реальных условиях.

Дальнейшее развитие метода акустической пластовой инверсии включало следующие аспекты: ввод оптимизации положения границ пластов на оси; гибкий подход к учету априорной информации, позволяющий задавать диапазоны I_p в реперных пластах и в промежутках между ними без выхода за пределы линейной оптимизации; попытка создания метода многоканальной инверсии, в котором в оптимизации участвуют группы трасс временного разреза для получения участка сейсмоакустической модели с кусочно-линейными границами слоев.

В алгоритме упругой пластовой инверсии используется модель, в которой плоская продольная волна под углом φ падает на пачку

однородных пластов с плоскопараллельными границами.

Параметры модели описываются вектором \vec{a} , который содержит значения объема, плотности и давления для каждого пласта модели. Целью решения задачи является поиск вектора \vec{a} , который минимизирует функционал Φ_1 , описываемый следующим образом:

$$\Phi_1 = \sum_{i,j}^{N_i, N_j} [s^i(t_j) - m^i(t_j, \vec{a})]^2. \quad (1)$$

Функция $s^i(t)$ представляет собой i -ю трассу реальной сейсмограммы, а $m^i(t)$ – i -ю трассу синтетической сейсмограммы. Для расчета синтетической трассы $m^i(t)$ необходимо использовать кинематическую модель среды, чтобы определить углы падения плоской волны на поверхность первого слоя (φ_i). Затем используется эффективный алгоритм решения прямой задачи.

При оптимизации функционала Φ_1 задается начальное приближение вектора искомых параметров \vec{a}^0 , для линеаризации сейсмического волнового поля относительно искомых параметров \vec{a} используется разложение $m^i(t_j, \vec{a})$ в ряд Тейлора, в котором оставляются только первые два слагаемых, а остальные отбрасываются:

$$m^i(t_j, \vec{a}) = m^i(t_j, \vec{a}^0) + \sum_k \frac{dm^i(t_j, \vec{a}^0)}{da_k \cdot \Delta a_k}, \quad (2)$$

где $\Delta a_k = a_k - a_k^0$ – разность k -х значений векторов \vec{a} и \vec{a}^0 .

При подстановке $m^i(t_j, \vec{a})$ в формулу функционала Φ_1 получаем функционал Φ_2 , в который добавляется слагаемое, ограничивающее энергию корректирующего вектора $\Delta \vec{a}$:

$$\Phi_2 = \sum_{i,j}^{N_i, N_j} \left[s^i(t_j) - m^i(t_j, \vec{a}^0) - \sum_k \frac{dm^i(t_j, \vec{a}^0)}{da_k \cdot \Delta a_k} \right]^2 + \beta \cdot \sum_k \Delta a_k^2. \quad (3)$$

Решение задачи минимизации Φ_2 приводит к системе линейных уравнений, которая позволяет найти значения Δa_k . Коэффициенты этой системы зависят от разностей между дифференциальными трассами типа $\delta m^i(t_j, \vec{a}^0)/\delta a_k$. Для практической реализации алгоритма трассы вычисляются с использованием метода конечных разностей:

$$\frac{dm^i(t_j, \vec{a})}{da_k} = \frac{m^i(t_j, \vec{a} + \delta a_k) - m^i(t_j, \vec{a})}{\delta a_k}. \quad (4)$$

После этого для нахождения корректирующего вектора $\Delta \vec{a}^0$ выполняется цикл итераций по решению систем линейных уравнений, при котором для нахождения n -го приближения $\Delta \vec{a}^{(n)}$ предыдущее исходное приближение $\Delta \vec{a}^{(n-2)}$ заменяется на полученное $\Delta \vec{a}^{(n-1)}$.

Алгоритм был протестирован на простых моделях среды, содержащих до пяти слоев между двумя полупространствами, и показал высокую эффективность в определении акустических и геометрических параметров модели. Но у него имеется недостаток, связанный с упрощенным способом регуляризации, который не позволяет задавать диапазоны изменения акустических параметров в различных блоках модели. Исправить этот недостаток позволяет акустический каротаж – метод измерения времени распространения упругих волн в горных породах, которые расположены в скважине. Информацию, полученную при помощи метода, можно применять для определения пористости коллектора – горной породы, обладающей способностью вмещать нефть, газ и воду и отдавать их при разработке и предоставлении информации для сейсморазведки.

Использование акустического каротажа вместе с другими методами, такими как полевая сейсморазведка, помогает получить дополнительную информацию о геологической структуре и свойствах горных пород. Большая разрешающая способность приборов акустического каротажа на высоких частотах обеспечивает детальную информацию о породах внутри скважины. Скважинный прибор акустического каротажа работает путем испускания импульсов упругих волн частотой 25 кГц, которые распространяются во всех направлениях от источника. При воздействии источника упругих колебаний соседние частицы горной породы начинают колебаться относительно положения равновесия.

В акустическом каротаже практический интерес представляет время, затраченное упругой волной на преодоление расстояния от источника до приемника. Обычно данные

акустического каротажа не представляются в виде простых временных значений, так как во время измерений могут быть разные расстояния между источником и приемником, что делает результаты несопоставимыми. Вместо этого данные обычно представлены величиной, обратной скорости, измеряемой в единицах времени на единицу расстояния, что позволяет сравнивать данные, полученные приборами с разными расстояниями между источником и приемником.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Подготовка материала к сейсмической инверсии, анализ качества данных и корректировка показаний

В географическом положении изучаемый участок находится в центральной части Западно-Сибирской равнины (рис. 1). Исследуемая территория расположена на участке двух крупных геоблоков: Фроловской мегавпадины и Среднеобского геоблока [14].

Были проанализированы кривые каротажа потенциала самополяризации и гамма-каротажа. Видно, что в районе неокома есть предпосылки к коллекторам с углеводородами. Запись геофизических методов выполнялась различными приборами. С целью исключения аппаратного влияния на показания выполнена стандартизация данных с помощью методики Ш. А. Губермана, основанной на постоянстве физических свойств разреза по площади, что позволяет использовать статистические характеристики геологических разрезов [15].

В качестве эталона выбрана скважина, вскрывшая доюрское основание и наиболее полно характеризующая породы осадочного чехла. Привязка скважинных данных была выполнена к сейсмическому кубу, полученному по результатам обработки в 16 скважинах исследуемой площади. Коэффициент корреляции сейсмических параметров и результатов синтетического моделирова-

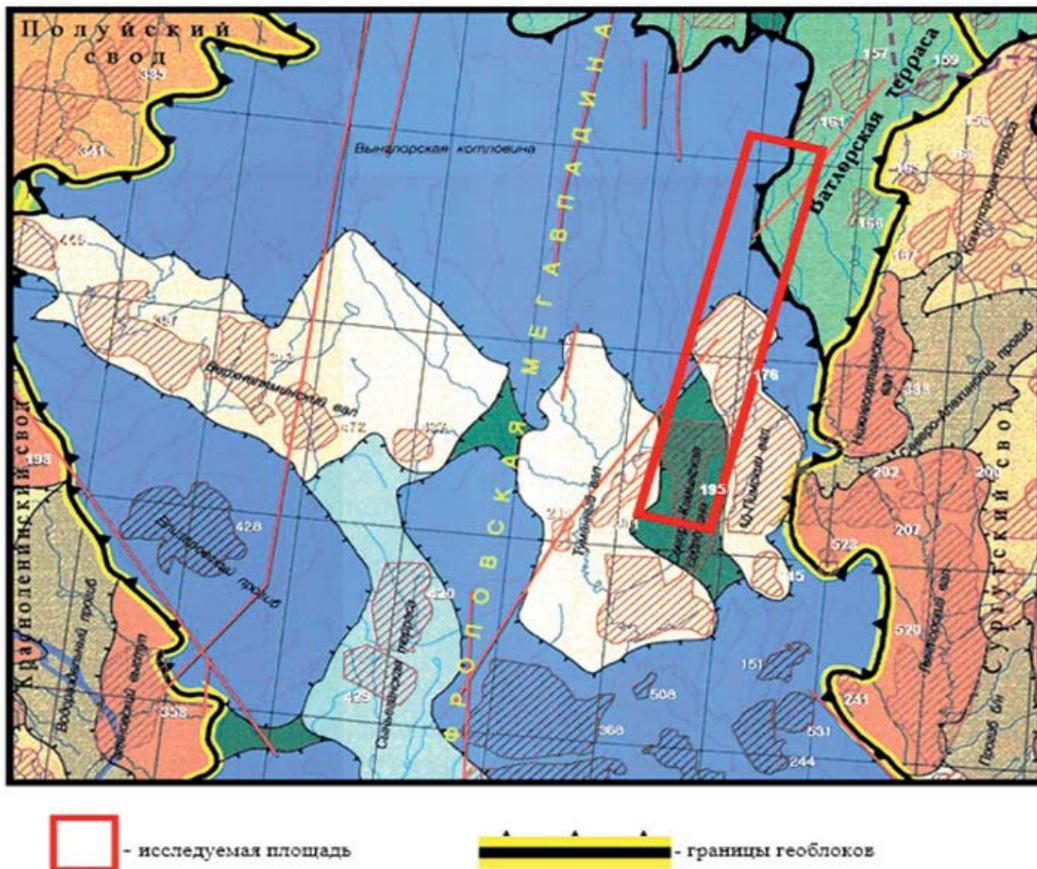


Рис. 1. Фрагмент тектонической карты Западно-Сибирской плиты
Примечание: составлено по [16].

ния имеет значение от 0,55 до 0,88, представленных на планшетах привязки скважин (рис. 2).

Для определения возможностей локализации интервалов коллекторов в поле упругих параметров был выполнен анализ кросс-плотов (графиков). В качестве этих параметров использованы следующие упругие характеристики: плотность (ρ_{Π}), скорость продольных волн (v_p) и акустический продольный импеданс (AI).

Акустический импеданс был предварительно рассчитан для всех скважин по формуле:

$$AI = \rho_{\Pi} \cdot v_p \quad (5)$$

На рис. 2 показаны графики параметров по всем скважинам для неокомских пластов, участвующих в работе. Они имеют характерное поведение, соответствующее эмпирическим моделям Гарднера для песчаников (красная линия тренда) и глин (синяя линия тренда), что указывает на приемлемое качество замеров и корректную подготовку данных [17].

Уравнение Гарднера связывает скорость сейсмической продольной волны с объемной плотностью литологии, в которой распространяется волна:

$$\rho = \alpha \cdot v_p^{\beta}, \quad (6)$$

где ρ – плотность в г/см^3 ,

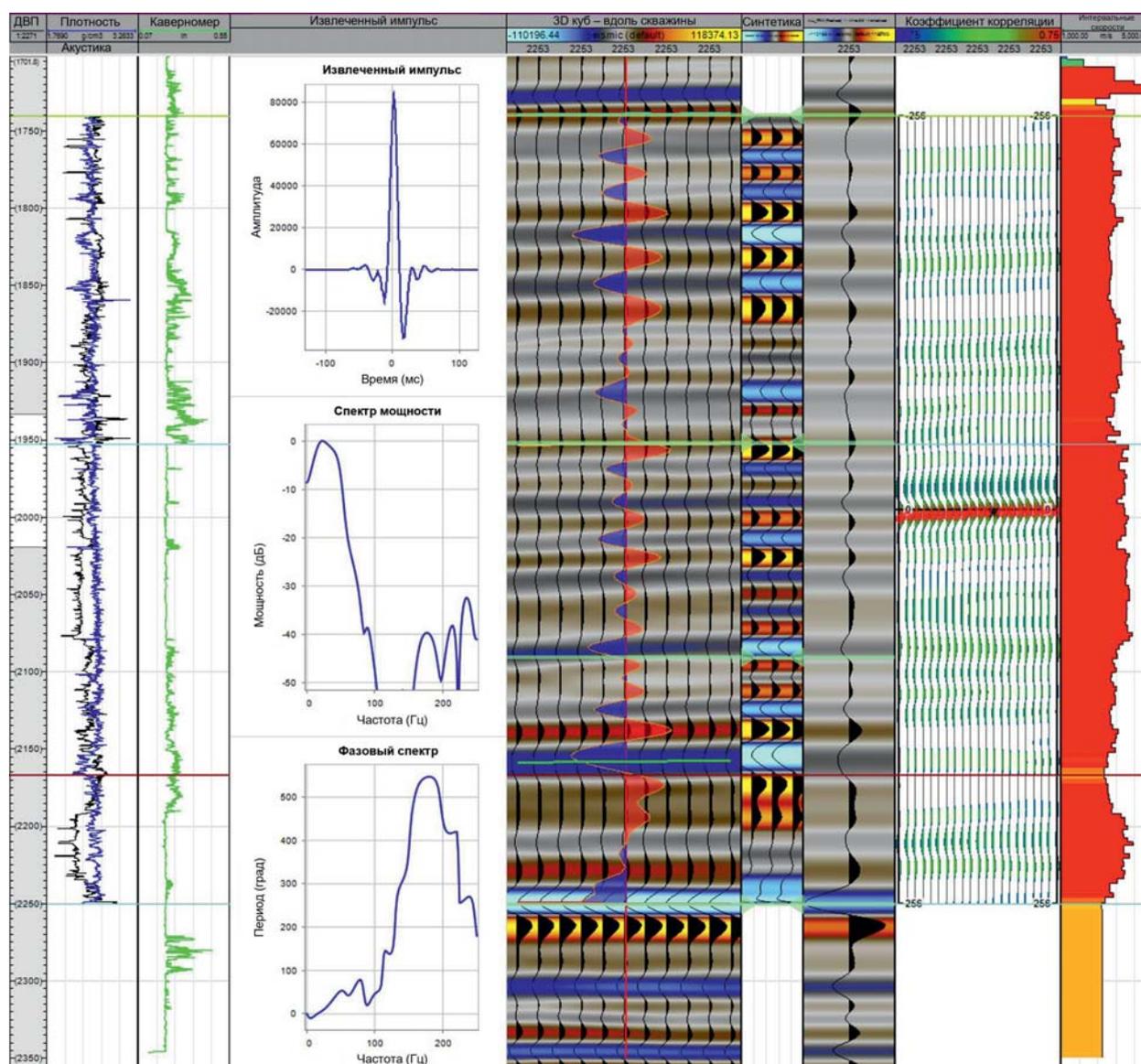


Рис. 2. Планшеты привязки скважин, полученные с помощью программы Petrel

Примечание: составлено авторами.

v_p^β – скорость волны, выраженная в м/с,
 α и β – эмпирически выведенные константы, $\alpha = 0,31$, $\beta = 0,25$.

Из анализа акустических свойств можно сделать вывод, что предпосылки на разделение коллектор–неколлектор, на песчаник и глину слабые, но они есть, что является обоснованием для проведения инверсии (рис. 3).

Отметим следующие этапы применяемой технологии сейсмической инверсии:

- предварительная подготовка данных сейсмоки и географических информационных систем, извлечение импульсов;
- петрофизическое обоснование проведения сейсмической инверсии;

- построение низкочастотной модели;
- анализ параметров инверсии в скважинах и проведение инверсии по 3D-кубу исследуемой площади.

Для проведения акустической инверсии применяли 14 основных скважин, остальные скважины были использованы в качестве контрольных. После привязки скважин проведено извлечение уточненных импульсов для каждой из них. Важным этапом при проведении сейсмической инверсии является процедура построения низкочастотной модели, с помощью которой начинает работать алгоритм решения обратной задачи. Для создания фоновой модели в качестве исходной информации

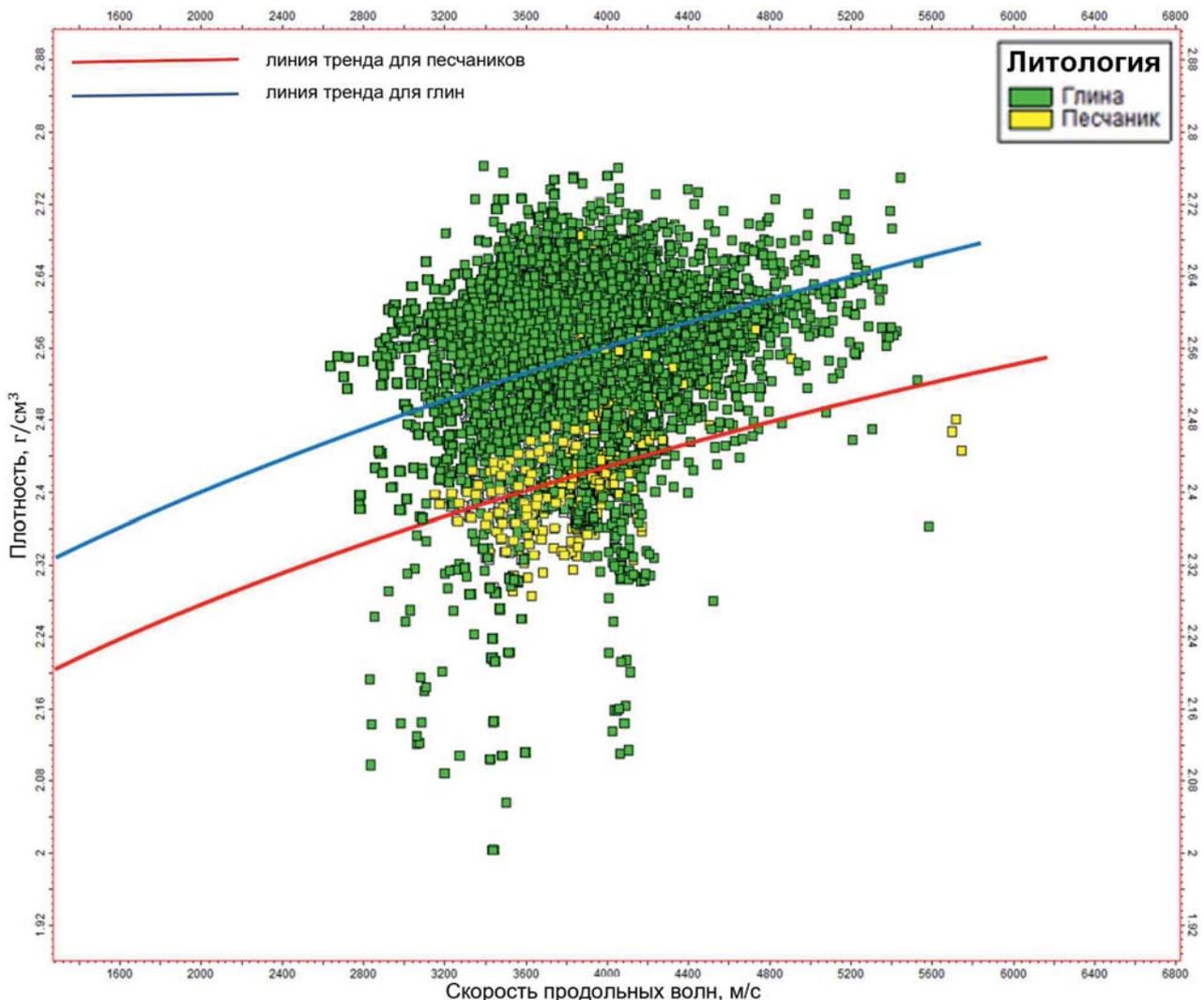


Рис. 3. График «скорость продольных волн – плотность» по всем скважинам (синяя кривая – значения акустического импеданса по скважинным параметрам, красная – значения акустического импеданса, полученные в результате инверсии)

Примечание: составлено авторами.

использовались кривые акустических импедансов в 14 скважинах и сейсмические горизонты. К полученному результату применялся фильтр низких частот с граничным значением 10 Гц во временной области.

На рис. 4 показан процесс подбора дистанции и весовых коэффициентов, с которыми каждая скважина оказывает влияние на конечный результат расчетов.

Далее выполнен расчет куба акустического импеданса с использованием среднего значения импульса. Одной из задач куба акустического импеданса является улучшение качества прослеживаемости отражающих горизонтов. На основе куба были прослежены отражающие горизонты в районе неокома в интервале 1975–2175 мс. Основным контролем качества выполненной акустической инверсии являлся анализ зависимостей между восстановленным и акустическим импедансом, рассчитанным по скважинным данным.

Импедансы сравнивали в сейсмическом диапазоне частот, для этого кривые акустического импеданса скважин были отфильтрованы с частотой 60 Гц, с применением обратного расчета синтетического сейсмического куба на основе сейсмического импульса. На рис. 5 последовательно показаны карта атрибута среднеквадратичных амплитуд и спектральная декомпозиция. Справа на рисунке имеются значения амплитуд: чем ниже амплитуды, тем темнее цвет (синий, фиолетовый), а высокие значения соответствуют зеленому, желтому и красному цветам.

Сейсмическая инверсия выполнялась в программном модуле Quantitative interpretation на основе метода детерминистической инверсии данных. Выполнена стандартизация кривых ГИС – геофизические исследования скважин, они были определены в интервале меловые-юрские отложения для устранения аномалий.

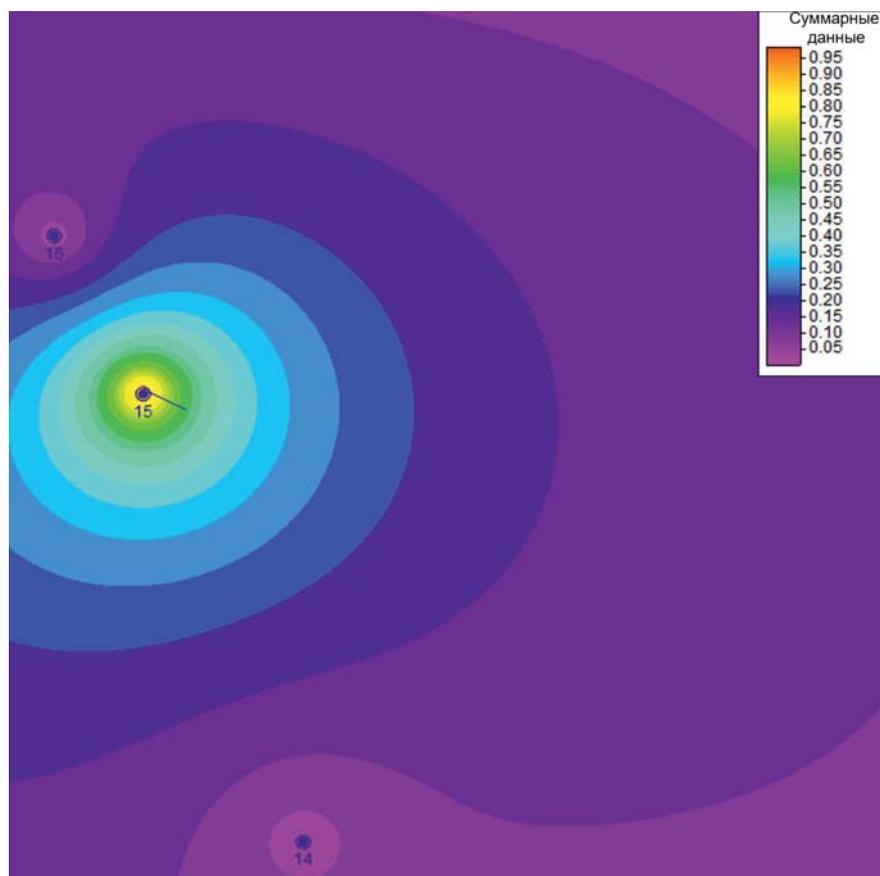


Рис. 4. Определение коэффициента влияния и дистанции каждой скважины при расчете низкочастотной фоновой модели

Примечание: составлено авторами.

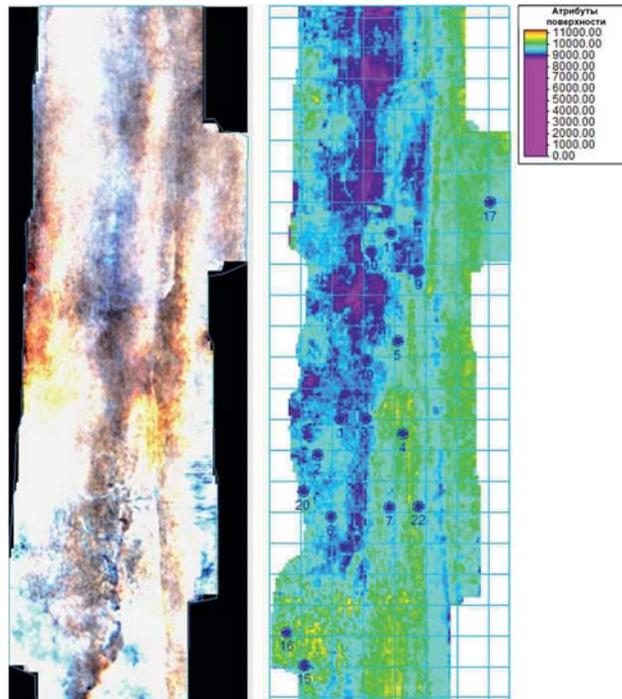


Рис. 5. Спектральная декомпозиция и карты атрибута среднеквадратичных амплитуд (слева – срез куба спектральной декомпозиции, справа – карта атрибута амплитуд, показывающая на возможное наличие углеводородов, RGB-смешивание)

Примечание: составлено авторами.

После проверки динамики получена спектральная декомпозиция на основе куба акустического импеданса, которая визуально подтверждает динамический анализ исследования. Высокие значения амплитуд могут говорить о наличии в изучаемой породе углеводородов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью программного модуля построен куб акустического импеданса, по которому были прослежены отражающие горизонты в районе неокомских отложений. Произведена проверка правильности куба акустического импеданса, в работе сравнивали исходный и синтетический кубы. По кубу разности видно, что в неокомском интервале остался ус-

ловно только шум, в то время как в юрских отложениях амплитуды растут, т.к. инверсия узконаправленная. Результаты инверсии могут быть использованы для принятия важных решений, связанных с разработкой ресурсов, строительством производственной инфраструктуры, оценкой геологической стабильности, проведения геолого-разведочных и геофизических работ по добыче нефти и газа.

Проведя анализ динамических атрибутов, на основе отражающих горизонтов по кубу акустического импеданса можно заключить, что высокие значения амплитуд позволяют сделать вывод о наличии в породе углеводородов для последующей рекомендации на заложение скважин добычи нефти и газа.

Список источников

1. Шаповалов М. Ю., Хамитуллин И. М., Шакиров Р. Р. и др. Использование сейсмической инверсии для прогноза коллектора в интервале прибрежно-континентальных отложений юрского комплекса // Георесурсы. 2023. Т. 25, № 3. С. 49–56.
2. Ненюкова А. И., Спичак В. В. Поиск перспективных участков для разведки геотермальных ре-

References

1. Shapovalov M. Yu., Khamitullin I. M., Shakirov R. R. et al. Reservoir characterization in coastal-continental environment of the Jurassic complex based on seismic data inversion. *Georesources*. 2023;25(3):49–56. (In Russian).
2. Nenyukova A. I., Spichak V. V. Search for promising locations to explore geothermal resources based on

- сурсов на основе комплексного анализа разрезов петро- и теплофизических свойств пород // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46, № 1. С. 6–19.
3. Ognev I. N., Ebbing J., Lösing M. B. et al. The thermal state of Volgo–Uralia from Bayesian inversion of surface heat flow and temperature. *Geophysical Journal International*. 2023;232(1):322–342.
 4. Алексеев М. М., Семенов О. Ю. Место и роль технологий горения в разработке нефтяных и газовых месторождений // Нефтяная столица : сб. материалов Шестого междунар. молодежного науч.-практич. форума, 22–23 марта 2023 г., г. Москва. М. : Центр научно-технических решений (АНО ЦНТР), 2023. С. 24–28.
 5. Guo Z., Lv X., Liu C. et al. Characterizing gas hydrate-bearing marine sediments using elastic properties – Part 2: Seismic inversion based on a pore-filling–solid matrix decoupling scheme. *J Mar Sci Eng*. 2022;10(10):1497.
 6. Дёмко А. И., Семенов О. Ю. Телекоммуникационная система мониторинга и эксплуатации магистральных нефтегазопроводов : производственно-практич. изд. Сургут : Изд. центр СурГУ, 2020. 201 с.
 7. Кузнецов О. Л., Гайнанов В. Г., Радван А. А. и др. Применение сейсмических рассеянных и эмиссионных волн для повышения эффективности освоения месторождений углеводородов // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2017. № 4. С. 54–59.
 8. Алексеев А. Д., Ганиев М. И., Дёмко А. И. и др. Метод исследования стратификации газов сканирующим лазерным лучом при обнаружении утечек из нефтепровода // Вестник кибернетики. 2018. № 4. С. 120–128.
 9. Миронов Д. Т., Ашмян К. Д., Гореликов А. В. Учет особенностей строения пластов баженовской свиты при построении гидродинамических моделей и моделировании термогазового воздействия // Вестник кибернетики. 2018. № 2. С. 109–119.
 10. Полищук А. М., Якуш С. Е., Хлебникова Т. Д. и др. Возможный сценарий добычи сланцевой нефти Баженовской нефтематеринской свиты // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022. № 4. С. 9–23. DOI 10.17122/ntj-oil-2022-4-9-23.
 11. Барышев Л. А., Редкоп В. А., Шехтман Г. А. Возможности изучения терригенных коллекторов наземной и скважинной сейсморазведкой в Восточной Сибири // Технологии сейсморазведки. 2009. № 2. С. 64–76.
 12. Данько Д. А. Сравнение методов детерминистической акустической инверсии для выделения акустически контрастных объектов по сейсмическим данным // Геофизика. 2016. № 1. С. 2–11.
 - joint analysis of sections of petro- and thermophysical properties of rocks. *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2023;46(1):6–19. (In Russian).
 3. Ognev I. N., Ebbing J., Lösing M. B. et al. The thermal state of Volgo–Uralia from Bayesian inversion of surface heat flow and temperature. *Geophysical Journal International*. 2023;232(1):322–342.
 4. Alekseev M. M., Semenov O. Yu. Role and place of combustion technologies in the development of oil and gas fields. In: *Proceedings of the Sixth International Youth Applied Research Forum “Oil Capital”*, March 22–23, 2023, Moscow. Moscow: Tsentr nauchno-tehnicheskikh reshenii (ANO TsNTR); 2023. p. 24–28. (In Russian).
 5. Guo Z., Lv X., Liu C. et al. Characterizing gas hydrate-bearing marine sediments using elastic properties – Part 2: Seismic inversion based on a pore-filling–solid matrix decoupling scheme. *J Mar Sci Eng*. 2022;10(10):1497.
 6. Dyomko A. I., Semenov O. Yu. Telekommunikatsionnaya sistema monitoringa i ekspluatatsii magistralnykh neftegazoprovodov. Trade edition. Surgut: Publishing house of SurGU; 2020. 201 p. (In Russian).
 7. Kouznetsov O. L., Gaynanov V. G., Radwan A. A. et al. Application of scattered and emitted seismic waves for improving efficiency of exploration and development of hydrocarbon fields. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2017;(4):54–59. (In Russian).
 8. Alekseev A. D., Ganiev M. I., Dyomko A. I. et al. Method of testing gas stratification with scanning laser ray for detecting leakage from oil pipeline. *Proceedings in Cybernetics*. 2018;(4):120–128. (In Russian).
 9. Mironov D. T., Ashmyan K. D., Gorelikov A. V. Features of Bazhenov Formation’s seam structure in the construction of hydrodynamic models and thermal gas treatment modeling. *Proceedings in Cybernetics*. 2018;(2):109–119. (In Russian).
 10. Polishchuk A. M., Yakush S. E., Khlebnikova T. D. et al. Possible scenario for shale oil production in the Bazhenov Formation. *Geology, Prospecting and Exploration of Oil and Gas Fields*. 2022;(4):9–23. DOI 10.17122/ntj-oil-2022-4-9-23. (In Russian).
 11. Baryshev L. A., Redekop V. A., Shekhtman G. A. Vozmozhnosti izucheniia terrigenykh kollektorov nazemnoi i skvazhinnoi seismorazvedkoi v Vostochnoi Sibiri. *Tekhnologii seismorazvedki*. 2009;(2):64–76. (In Russian).
 12. Danko D. A. Comparison of deterministic acoustic inversion methods for prediction of the prospective acoustically contrast objects from seismic data. *Journal of Geophysics*. 2016;(1):2–11. (In Russian).
 13. Berdov V. A., Vlasov A. A., Lapkovsky V. V. Detection of reservoir boundaries in well profiles according to the well log via Petrel. In: *Interespo Geo-Sibir. Proceedings of the 8th International Conference “Nedropolzovanie. Gornoe delo. Novye napravleniia i tekhnologii poiska, razvedki i*

13. Бердов В. А., Власов А. А., Лапковский В. В. Выделение пластов межскважинного пространства по данным каротажа в программном комплексе Petrel // Интерэкспо Гео-Сибирь-2012 : VIII Междунар. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых», 10–20 апреля 2012 г., г. Новосибирск. Новосибирск, 2012. № 2. С. 76–80.
14. Шпильман В. И., Солопахина Л. А., Пятков В. И. Новая тектоническая карта Центральных районов Западной Сибири // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО : материалы 2-й науч.-практич. конф. Ханты-Мансийск : Путиведь, 1999. С. 96–115.
15. Губерман Ш. А. Неформальный анализ данных в геологии и геофизике. М. : Недра, 1987. 260 с.
16. Геология и нефтегазоносность Ханты-Мансийского автономного округа : атлас. URL: <https://crru.ru/atlas.html> (дата обращения: 09.01.2023).
17. Gardner G. H. F., Gardner L. W., Gregory A. R. Formation velocity and density – The diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*. 1974;39:770–780.
- razrabotki mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh*”, April 10–20, 2012, Novosibirsk. Novosibirsk; 2012. No. 2. p. 76–80. (In Russian).
14. Shpilman V. I., Solopakhina L. A., Pyatkov V. I. Novaia tektonicheskaia karta Tsentralnykh raionov Zapadnoi Sibiri. In: *Proceedings of the 2nd Research-to-Practice Conference “Puti realizatsii neftegazovogo potentsiala KhMAO”*. Khanty-Mansiysk: Putived; 1999. p. 96–115. (In Russian).
15. Guberman Sh. A. Neformalny analiz dannykh v geologii i geofizike. Moscow: Nedra; 1987. 260 p. (In Russian).
16. Geology and oil and gas potential of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug. Atlas. URL: <https://crru.ru/atlas.html> (accessed: 09.01.2023). (In Russian).
17. Gardner G. H. F., Gardner L. W., Gregory A. R. Formation velocity and density – The diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*. 1974;39:770–780.

Информация об авторах

М. М. Алексеев – кандидат физико-математических наук, доцент.

О. Ю. Семенов – кандидат физико-математических наук, доцент.

С. М. Сысоев – кандидат физико-математических наук, доцент.

Д. С. Фурукин – инженер.

Information about the authors

M. M. Alekseev – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

O. Yu. Semenov – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

S. M. Sysoev – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

D. S. Furukin – Engineer.

Научная статья
УДК 004.9
DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-2

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПОЛОЖЕНИЯ ПОЗВОНОЧНИКА

Дмитрий Константинович Берестин^{1✉}, Сергей Илишатович Хусаинов²

^{1,2}Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹berestin_dk@surgu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-3977-3281>

²khusainov@edu.surgu.ru

Аннотация. В данной работе представлена модель системы, которая позволяет отслеживать положение позвоночника пользователя, собирать статистику по его осанке, анализировать ее с помощью нейросети и предлагать пользователю индивидуальные рекомендации по подбору упражнений для коррекции осанки. В статье внимание уделяется мобильному приложению, потому что это удобно с точки зрения использования устройства и упрощает процесс разработки. В результате были определены и описаны требования к структуре и функционированию системы.

Ключевые слова: мобильное приложение, положение позвоночника, нейросеть

Для цитирования: Берестин Д. К., Хусаинов С. И. Модель системы мониторинга положения позвоночника // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 1. С. 17–22. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-2.

Original article

A MODEL OF A SPINE POSITION MONITORING SYSTEM

Dmitry K. Berestin^{1✉}, Sergey I. Khusainov²

^{1,2}Surgut State University, Surgut, Russia

¹berestin_dk@surgu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-3977-3281>

²khusainov@edu.surgu.ru

Abstract. The article presents a model of a spine position monitoring system that can gather posture statistics, analyze them using neural networks, and provide the user with personalized posture training instructions. The study focuses on a mobile app as it is user-friendly and simplifies system development. As a result, the requirements for the system's structure and operation were identified and described.

Keywords: mobile app, spine position, neural network

For citation: Berestin D. K., Khusainov S. I. A model of a spine position monitoring system. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(1):17–22. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-2.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно медицинской статистике, заболеваемость позвоночника растет из года в год. По оценке различных специалистов, около 85% взрослого населения сталкивается с различными видами заболеваний позвоночника, к примеру остеохондрозом. В настоящее время заболевания позвоночника возникают в наиболее трудоспособном возрасте – 25–35 лет [1]. При этом сейчас по статистике бо-

лезни позвоночника затрагивают и детское население. Это происходит в связи с тем, что с детства отсутствует спортивное и гигиеническое воспитание. Если заболевания позвоночника вовремя не обнаружить, то их последствия могут быть очень тяжелыми [2].

Разрабатываемая модель устройства и системы контроля и сбора информации будет представлять собой корсет, на котором размещены электронные датчики. Они, в свою

очередь, собирают информацию о положении позвоночника пользователя, а также вибрацией напоминают о нарушении положения. При этом предполагается возможность использования нейросетевых технологий для обработки данных о положении позвоночника, используя информацию с датчиков на корсете. В представленной исследовательской работе большую часть предполагается уделить мобильному приложению, потому что это удобно с точки зрения использования устройства.

Целью данного исследования является разработка технического устройства и мобильного приложения для сбора информации о положении позвоночника пользователя.

Актуальность данной темы исследования заключается в том, что современный образ жизни и массовое использование персональных компьютеров в жизни общества значительно увеличивает риск развития различных заболеваний позвоночника и околопозвоночных соединительных тканей [3]. Эти заболевания могут приводить к хроническим болям, ограничению подвижности, нарушению работы внутренних органов и инвалидности. В связи с этим необходимо разрабатывать новые эффективные методы, которые будут направлены на профилактику и коррекцию позвоночника. Предполагается, что разрабатываемое устройство в дальнейшем возможно использовать для раннего выявления нарушений осанки и формирования правильной позы. Предполагается, что данное устройство возможно к использованию детьми, подростками, а также взрослыми, при этом данное устройство будет особенно полезно людям, которые большую часть времени ведут малоподвижный образ жизни или склонны к заболеваниям позвоночника.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Разрабатываемая система предназначена для коррекции осанки. Предполагается, что она будет помогать формированию правильной позы пользователей. На нарушение осанки у людей чаще всего влияют такие факторы,

как сидячий образ жизни, неправильное расположение рабочего места, недостаток физической активности, стресс, депрессия и др. Все это вместе взятое может привести к нарушению баланса между мышцами – сгибателями и разгибателями позвоночника, усилению или сглаживанию физиологических изгибов спины, ущемлению нервных корешков и сосудов. В результате человек может испытывать хронические боли в спине, шее, голове, ограничение подвижности и различных других функций [4].

Разрабатываемое устройство и система будут представлять собой интеллектуальное устройство, которое анализирует положение спины пользователя с помощью электронных датчиков и обратной связи – вибраций или звукового сигнала. В результате пользователь будет знать свою позу, корректировать ее в соответствии с получаемой обратной связью от системы и поддерживать оптимальное положение. При этом предполагается, что система будет собирать информацию о положении спины пользователя и передавать ее в мобильное приложение. Планируется, что в дальнейшем система будет использовать нейросетевые технологии для обработки данных о положении позвоночника, получаемых с датчиков, а также будет рекомендовать упражнения для укрепления мышц спины и регистрировать процесс их выполнения и изменения осанки пользователя.

Разрабатываемая модель должна выполнять функции обработки, хранения информации и оповещения пользователя системы. При разработке модели системы были определены следующие функциональные требования [5]:

- система должна подключаться к устройству с датчиками положения через Bluetooth и получать данные о позе пользователя в реальном времени;

- система должна анализировать данные о позе пользователя и определять наличие или отсутствие нарушений осанки, таких как сутулость, сколиоз, кифоз и другие;

- система должна информировать пользователя о его позе и прогрессе коррекции осанки с помощью графиков, диаграмм, ин-

дикаторов и текстовых сообщений на экране мобильного устройства;

– система должна предлагать пользователю индивидуальную программу подбора упражнений для улучшения осанки, основанную на данных с датчиков и целях и физических атрибутах пользователя;

– система должна демонстрировать упражнения с помощью видео, анимации или изображений и контролировать их правильное выполнение с помощью датчиков;

– система должна давать пользователю советы по правильной организации рабочего места, а также напоминать о необходимости делать перерывы и растяжку в течение дня;

– система должна учитывать данные об активности пользователя при анализе его позы и подборе упражнений.

Система на вход получает данные от пользователя о его персональных физических параметрах и данные с датчиков о положении тела.

Выходными данными системы является статистика положений тела, переработанная и подвергнутая относительной оценке в процентах от нормы, классифицированная по видам нарушений позвоночника, и комплекс

упражнений, подходящих для следующей тренировки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Была спроектирована модель работы системы и функции пользователя, которые отображены в виде Use Case диаграммы. Она представлена на рисунке, отражающем отношения между акторами и прецедентами, и является составной частью модели прецедентов, позволяющей описать систему на концептуальном уровне [6].

В результате предполагается следующий способ функционирования. Пользователь заполняет данные профиля, надевает устройство, производит первичную настройку, после чего устройство начинает сбор статистики и передачу ее в мобильное приложение. Приложение проанализирует данные профиля и статистику положений и подберет программу упражнений.

При разработке модели системы мониторинга положения позвоночника были рассмотрены следующие возможные прецеденты [7, 8].

Название прецедента: Подбор физических упражнений.

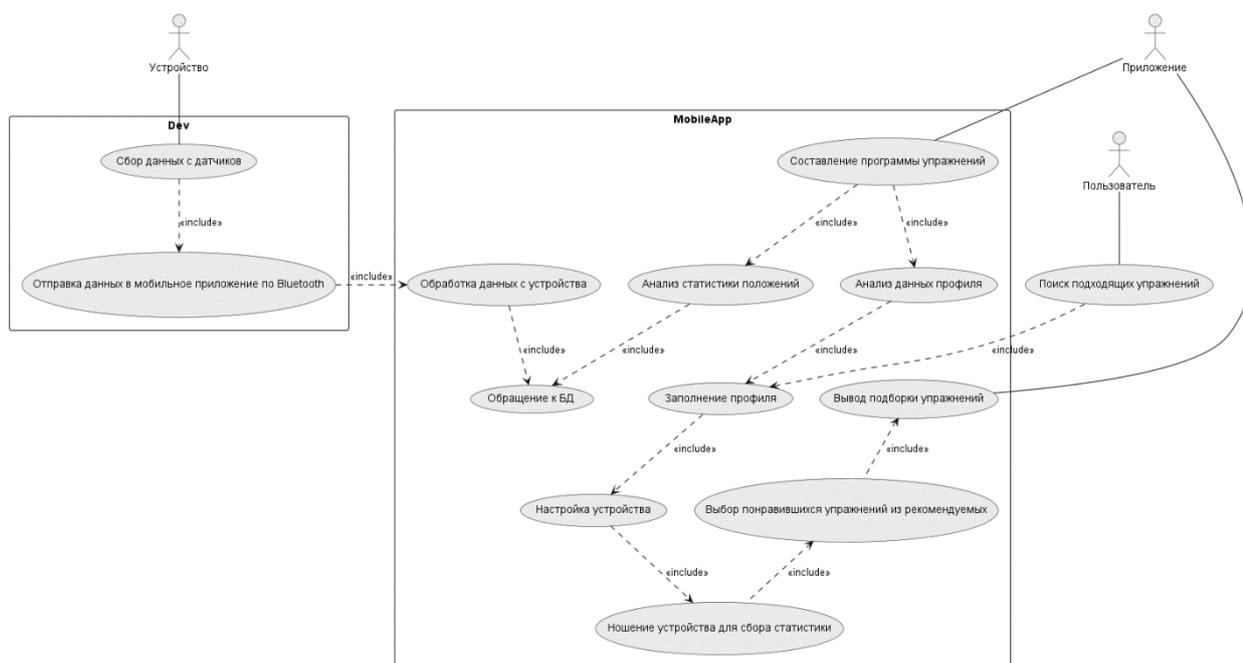


Рисунок. Use Case диаграмма модели мониторинга положения позвоночника
Примечание: составлено авторами.

Заинтересованные лица и требования:

Пользователь: хочет получить рекомендации по физическим упражнениям, которые будут соответствовать его заболеванию, весу, росту, возрасту и уровню подготовки.

Система: должна обрабатывать данные от датчиков положения (анализировать статистику) и состояние пользователя (использовать анкету профиля пользователя), использовать модуль для подбора оптимальных упражнений и отображать их на мобильном приложении.

Предусловия:

1. Пользователь носил корсет с датчиками положения какое-то время и собрана статистика положений.

2. Пользователь заполнил анкету с данными о своем заболевании, весе, росте, возрасте и уровне подготовки.

Постусловия:

1. Пользователь получил список рекомендованных упражнений на мобильном приложении.

2. Система сохранила данные о выборе пользователя и его прогрессе.

Основной успешный сценарий:

1. Пользователь открывает мобильное приложение и выбирает опцию «Подбор упражнений».

2. Система запрашивает данные от датчиков положения и анализирует текущее состояние пользователя.

3. Система использует модуль экспертной системы для первичного подбора оптимальных упражнений для пользователя на основе данных его профиля и нейросеть для второго уровня выборки на основе статистики.

4. Система отображает список рекомендованных упражнений на мобильном приложении с инструкциями и иллюстрациями.

5. Пользователь просматривает список упражнений и выбирает те, которые ему подходят или интересны.

6. Система сохраняет данные о выборе пользователя и его прогрессе.

Альтернативный неуспешный сценарий:

1. Пользователь открывает мобильное приложение и выбирает опцию «Подбор упражнений».

2. Система не может получить данные от датчиков положения из-за проблем с подключением или батареей.

3. Система сообщает пользователю об ошибке и предлагает повторить попытку или использовать режим без датчиков.

4. Пользователь выбирает «повторить попытку» или «использовать режим без датчиков».

5. Если пользователь выбрал «повторить попытку», то сценарий продолжается с шага 2. Если пользователь выбрал режим без датчиков, то сценарий продолжается с шага 3 основного успешного сценария.

Сценарий с недостоверной информацией:

1. Пользователь открывает мобильное приложение и выбирает опцию «Подбор упражнений».

2. Система запрашивает данные от датчиков положения и анализирует текущее состояние пользователя.

3. Система обнаруживает, что данные от датчиков положения не валидируются, возможно, пользователь неправильно использует устройство.

4. Система сообщает пользователю о несоответствии данных и предлагает проверить крепления.

5. Пользователь проверяет крепления датчиков и исправляет их положение или отказывается от этого.

6. Система повторно запрашивает данные от датчиков положения и анализирует текущее состояние пользователя.

7. Если данные от датчиков положения валидируются, то система использует для подбора оптимальных упражнений для пользователя его данные и статистику.

8. Если данные от датчиков положения не валидируются, то система предупреждает пользователя о рисках использования неверных рекомендаций и предлагает продолжить без датчиков или завершить сеанс.

9. Пользователь выбирает «продолжить без датчиков» или «завершить сеанс».

10. Если пользователь выбрал «продолжить без датчиков», то система использует нейросеть для подбора оптимальных упражнений для пользователя на основе его данных из анкеты и статистики.

11. Если пользователь выбрал «завершить сеанс», то система закрывает мобильное приложение.

Предлагаемый интерфейс моделируемой системы положения позвоночника состоит из следующих компонентов: при первом открытии приложения пользователь видит окно авторизации, где ему предлагают создать аккаунт, войти с аккаунтом Google или уже существующим аккаунтом. Второе окно, которое видит пользователь после регистрации, – окно заполнения данных о пользователе. Пользователю предлагается ввести пол, дату рождения, вес, рост, уровень подготовки и заболевание (если есть). После заполнения профиля пользователь может открыть экран тренировки, чтобы увидеть предлагаемые упражнения. С этого экрана, нажав на упражнение, можно получить инструкции по технике выполнения основных базовых упражне-

ний. Отдельным пунктом будет показан экран статистики положений позвоночника пользователя, где будет показана правильность положения позвоночника в виде условной оценки в процентах от идеальной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования была рассмотрена предметная область физической реабилитации пациентов с заболеваниями позвоночника, проведен обзор аналогов устройств – корректоров осанки, представленных уже существующими системами и программными решениями. В результате были определены и описаны требования к структуре и функционированию системы и к видам обеспечения: информационному, программному, техническому. Были реализованы следующие диаграммы: модель предметной области в нотации UML, диаграмма бизнес-процессов в нотации BPMN, диаграмма вариантов использования Use Case. Данные диаграммы отражают архитектуру модели системы и требования к программному обеспечению. В данной публикации представлена модель только Use Case диаграммы.

Список источников

1. Бубновский С. М. Остеохондроз – не приговор! М. : Эксмо, 2023. 192 с.
2. Мищенко И. А., Черных С. В. Специальные физические упражнения в коррекции мышечного дисбаланса у девочек 7–8 лет с асимметричной осанкой и сколиозом // Ученые записки университета имени П. Ф. Лесгафта. 2023. № 1. С. 334–338.
3. Русинова И. И., Батуева А. Э. Способ коррекции мышечного дисбаланса у детей с нарушением осанки и сколиозом 1 и 2 степени : патент 2387467C1 Рос. Федерация. № 2008145512/14 ; заявл. 18.11.2008 ; опубл. 27.04.2010. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2387467C1_20100427.pdf (дата обращения: 15.02.2024).
4. Норкин И. А. Способ лечения и профилактики сколиоза : патент 2309776C2 Рос. Федерация. № 2006100727/14 ; заявл. от 10.01.2006 ; опубл. 10.11.2007. URL: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002309776_20071110_C2_RU/?ysclid=ismugqrij4495487074 (дата обращения: 15.02.2024).

References

1. Bubnovsky S. M. Osteochondroz – ne prigovor! Moscow: Eksmo; 2023. 192 p.
2. Mishchenko I. A., Chernykh S. V. Special physical exercises for the correction of muscle imbalance in girls 7–8 years old with asymmetric posture and scoliosis. *Uchenye zapiski universiteta imeni P. F. Lesgafta*. 2023;(1):334–338. (In Russian).
3. Rusinova I. I., Batueva A. E. Method for correction of muscular imbalance in children with fault in posture and scoliosis 1 and 2 degree. RU patent 2387467C1 No. 2008145512/14, filed November 18, 2008, issued April 27, 2010. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2387467C1_20100427.pdf (accessed: 15.02.2024). (In Russian).
4. Norkin I. A. Method for treating and preventing scoliosis. RU patent 2309776C2 No. 2006100727/14, filed January 10, 2006, issued November 10, 2007. URL: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002309776_20071110_C2_RU/?ysclid=ismugqrij4495487074 (accessed: 15.02.2024). (In Russian).

5. Лысенко В. А., Корзина М. И., Бачурин И. В. Системное проектирование информационных систем с веб-интерфейсом : моногр. Архангельск : САФУ, 2016. 128 с.
6. Янушко В. В., Еркин С. Н. Построение схемы процесса автоматизации проектирования изделия на базе UML (Use Case) диаграммы // Известия ЮФУ. Технические наук. 2009. № 12. С. 64–71.
7. Гусев А. А. Использование диаграммы прецедентов для проектирования информационной системы «Интересный маршрут» // Молодой исследователь Дона. 2018. № 3. С. 48–52.
8. Остроух А. В., Суркова Н. Е. Проектирование информационных систем : моногр. СПб. : Лань, 2019. 164 с.
5. Lysenko V. A., Korzina M. I., Bachurin I. V. Sistemnoe proektirovanie informatsionnykh sistem s veb-interfeisom. Monograph. Arkhangelsk: NArFU; 2016. 128 p. (In Russian).
6. Yanushko V. V., Erkin S. N. Construction of the process automation product design based on UML (Use Case) diagrams. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2009;(12):64–71. (In Russian).
7. Gusev A. A. Use of precedents diagram to design “interesting route” information system. *Molodoi issledovatel Dona*. 2018;(3):48–52. (In Russian).
8. Ostroukh A. V., Surkova N. E. Proektirovanie informatsionnykh sistem. Monograph. St. Petersburg: Lan; 2019. 164 p. (In Russian).

Информация об авторах

Д. К. Берестин – кандидат физико-математических наук, доцент.

С. И. Хусаинов – магистрант.

Information about the authors

D. K. Berestin – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

S. I. Khusainov – Master’s Degree Student.

Научная статья

УДК 004.8:517.4:58

DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-3

КЛАССИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ РАСТЕНИЙ СРЕДСТВАМИ ТЕКСТУРНОГО ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Валентин Валерьевич Брыкин¹✉, **Михаил Яковлевич Брагинский**²,
Дмитрий Викторович Тараканов³, **Ирина Олеговна Тараканова**⁴

^{1, 2, 3, 4}Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹valentin.brykin@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-6143-8992>

²braginskiy_my@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1332-463X>

³sprtdv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1851-1039>

⁴tarakanova_io@surgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7707-5890>

Аннотация. В данной работе предложен метод, комбинирующий вейвлет-преобразования и методы машинного обучения, для классификации состояния растительных культур по цветным цифровым изображениям. Входными данными для классификации являлся сформированный вектор текстурных признаков Харалика.

Реализована программа на высокоуровневом языке программирования Python для классификации цифровых изображений с использованием многоуровневого дискретного вейвлет-преобразования Добеши и классификационных методов машинного обучения – классической логистической регрессии и перцептрона. Показана эффективность предложенного метода в решении задачи многоклассовой классификации изображений, сделаны соответствующие выводы, оценены перспективы метода.

Ключевые слова: вейвлет-преобразование Добеши, текстурные признаки Харалика, нейронная сеть, логистическая регрессия, классификация цифровых изображений

Для цитирования: Брыкин В. В., Брагинский М. Я., Тараканов Д. В., Тараканова И. О. Классификация состояния растений средствами текстурного вейвлет-анализа и машинного обучения // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 1. С. 23–30. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-3.

Original article

CLASSIFICATION OF PLANTS HEALTH VIA TEXTURE WAVELET ANALYSIS AND MACHINE LEARNING

Valentin V. Brykin¹✉, **Mikhail Ya. Braginsky**², **Dmitry V. Tarakanov**³, **Irina O. Tarakanova**⁴

^{1, 2, 3, 4}Surgut State University, Surgut, Russia

¹valentin.brykin@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-6143-8992>

²braginskiy_my@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1332-463X>

³sprtdv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1851-1039>

⁴tarakanova_io@surgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7707-5890>

Abstract. The article demonstrates a method that combines the wavelet transform and machine learning methods to classify plants health using colored digital images. The input data for classification is comprised of a built vector of Haralick texture features.

The software was developed via the Python programming language to classify digital images with the multilevel discrete Daubechies wavelet transform and methods of classification for machine learning, particularly classic logistic regression and perceptron. The efficiency of this method for solving the problem of multiclass image classification is demonstrated. The study concludes and assesses the prospects of the method.

Keywords: Daubechies wavelet transform, Haralick texture features, neural network, logistical regression, digital images classification

For citation: Brykin V. V., Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V., Tarakanova I. O. Classification of plants health via texture wavelet analysis and machine learning. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(1):23–30. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-3.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня цифровизация сельского хозяйства, где полевые условия контролируются с помощью автономных систем, набирает все большие обороты. При создании систем подобного рода необходимо решать задачи идентификации болезни растений, анализировать динамику их роста.

Выявление болезней растений на ранней стадии и их своевременное предотвращение позволяет избежать больших потерь с точки зрения качества, количества и финансов. Таким образом, для укрепления экономики и сельского хозяйства государство нуждается в системах, способных выявлять болезни растений с высокой точностью и скоростью.

Имеется большая потребность в новых технологиях, отслеживающих рост растений и прогнозирующих воздействие на него различных факторов. В большинстве случаев болезни можно проследить по состоянию побегов растения (стебля, листьев). Значит, идентификация растений, выявление болезней, анализ роста играют существенную роль в успешном выращивании агрономических культур.

Все операции, связанные с обработкой изображений, выполняются в цветовом пространстве RGB, являющемся одним из основных способов представления изображений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вейвлет-преобразование

Вейвлет-преобразование представляет собой многомасштабное и многоразрешающее преобразование, позволяющее извлекать из изображения высокочастотные и низкочастотные компоненты. В данной работе используется дискретное двумерное вейвлет-преобразование Добеши (DWT2, вейвлет ‘db2’). Это означает, что квадратное изображение будет передано в качестве входных данных для вейвлет-функции, которая разделит все изображение на 4 компоненты (рис. 1).

Компоненты на рис. 1 – квадранты поддиапазонов частот, где L – низкая частота, H – высокая частота. Разложение может быть многоуровневым, где n – число уровней разложения. LL-квадрант представляет собой аппроксимацию исходного изображения (cA_n), HL – его вертикальные детали (cV_n), LH – горизонтальные детали (cH_n), HH – диагональные составляющие (cD_n) [1–4].

Текстура наряду с цветом является самой важной особенностью, если необходимо обнаружить какой-либо объект. Это относится и к классификации состояния растений – любое заболевание отличается характерным распространением по организму и цветом. На основе расположения пикселей на изображении

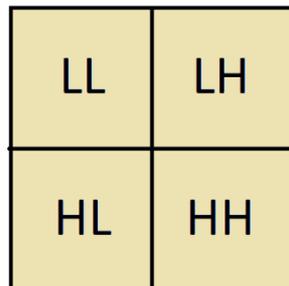


Рис. 1. Принцип одноуровневого двумерного вейвлет-разложения исходного изображения

Примечание: составлено по [1].

появляется возможность идентифицировать любой объект.

Существует множество способов текстурного анализа. Здесь используется метод текстурных признаков Харалика. Эти признаки рассчитываются на основе матрицы совпадения уровней серого (gray-level co-occurrence matrix, GLCM), являющейся оценкой плотности распределения вероятностей второго порядка $p_2(P, Q, Z, Y)$, полученной по одному изображению в предположении, что плотность вероятности p_2 зависит лишь от взаимного расположения P и Q . При этом Z является числом, обозначающим учет соседних пикселей, в том числе их расстояния от пикселя интереса. Y – значение ориентации пикселя интереса и соседних пикселей (в градусах) в интервале $[0; 2\pi)$ с шагом $\pi/4$.

Проще говоря, GLCM-матрица строится на основе вычислений частоты встречаемости пикселя с интенсивностью i с пикселем интенсивности j . Каждый элемент (i, j) в матрице смежности описывает число случаев, когда пиксель со значением i встречается с пикселем со значением j [5].

Хотя GLCM-матрица и представляет собой текстурные свойства, но она неудобна при непосредственном анализе изображения. Признаки Харалика, вычисляемые на ее основе, зарекомендовали себя куда лучше. В данной работе использовались 4 информативных признака, дающих наибольшую итоговую точность, из 14 возможных:

- **Контраст.** Измеряет пространственную частоту изображения:

$$con = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{i,j} (i - j)^2. \quad (1)$$

- **Несходство.** Мера расстояния между парами пикселей в интересующей области:

$$dis = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |i - j| \cdot p(i, j)^2. \quad (2)$$

- **Энергия** (второй угловой момент). Измеряет текстурную однородность изображения:

$$enr = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p(i, j)^2. \quad (3)$$

- **Однородность** (обратный разностный момент). Измеряет однородность изображения, которая возрастает при уменьшении тона серого:

$$hom = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{p_{i,j}}{1+(i-j)^2}. \quad (4)$$

Алгоритм классификации

Целью данной работы является классификация большого числа цифровых изображений растений на основе информации об их текстуре и цвете. Алгоритм классификации основан на совместном применении текстурных признаков Харалика, вейвлет-преобразования Добеши и многослойной нейронной сети.

Общий порядок действий алгоритма представлен в схеме на рис. 2.

Как можно увидеть из рис. 2, после инициализации набора данных и его предварительной обработки к каждому изображению применяется дискретное двумерное вейвлет-преобразование Добеши. Полученные коэффициенты затем группируются по квадрантам поддиапазонов частот, помогая извлекать текстурные признаки, которые пе-



Рис. 2. Схема предлагаемого алгоритма классификации

Примечание: составлено авторами.

редаются в качестве входных данных для классификационных методов.

Загрузка и подготовка данных

Исходные данные приведены на рис. 3 и представляют собой набор цветных цифровых изображений, распределенных по директориям, имена которых соответствуют названиям классов. Изображения были предварительно подготовлены – приведены к единому размеру 256×256 пикселей и распределены поровну на каждый класс (сбалансированы по 2200 единиц в каждом классе, суммарно 17600 фотографий). Таким образом, количество директорий совпадает с числом классов, т. е. 8.

Датасет на рис. 3 был загружен с общедоступного ресурса по исследованию данных Kaggle.

Получение значений признаков

Результат вейвлет-преобразования, описанного выше, приведен на рис. 4 на примере исходных данных.

Так как каждый из 4-х квадрантов представляет собой RGB-область размером 128×128 пикселей исходного изображения, для каждого из 3-х его каналов (красная, зеленая и синяя компонента) строится симметричная нормированная GLCM-матрица в 256 оттенках серого. Значит, для целого изображения будет вычислено 12 GLCM-матриц оттенков серого. В свою очередь, каждая такая матрица порождает 4 значения призна-

ков Харалика, описанных ранее. Таким образом, при одноуровневом вейвлет-преобразовании одноцветное изображение будет описано вектором-строкой из 48 коэффициентов-признаков Харалика. Вообще длина вектора может быть рассчитана по следующей формуле:

$$F = Q \cdot C \cdot H \cdot n, \quad (5)$$

где $Q = 4$ – количество областей (квадрантов), на которые разбивается изображение;

$C = 3$ – количество каналов цветного изображения (в данном случае RGB);

H – количество признаков Харалика, порождаемых GLCM-матрицей (здесь $H = 4$);

n – число уровней вейвлет-преобразования.

Формула (5) представляет расчет итогового числа текстурных признаков на единицу исходных данных.

Логично, что с увеличением количества n уровней вейвлет-разложения будет пропорционально расти и размерность F вектора признаков. В текущей работе число уровней разложения n было определено эмпирически. Для восьми классов оптимально значение $n = 3$. Отсюда итоговое число признаков $F = 4 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 3 = 144$. Для удобства восприятия и дальнейших расчетов все коэффициенты – это массив размером $m \times k$ (где $m = 17600$ – общее число изображений в наборе данных, $k = F + 1 = 145$ – итоговое количество признаков Харалика и метка класса, закодированная способом «label encoding») – были записаны



Рис. 3. Классы исходных данных
Примечание: составлено авторами.

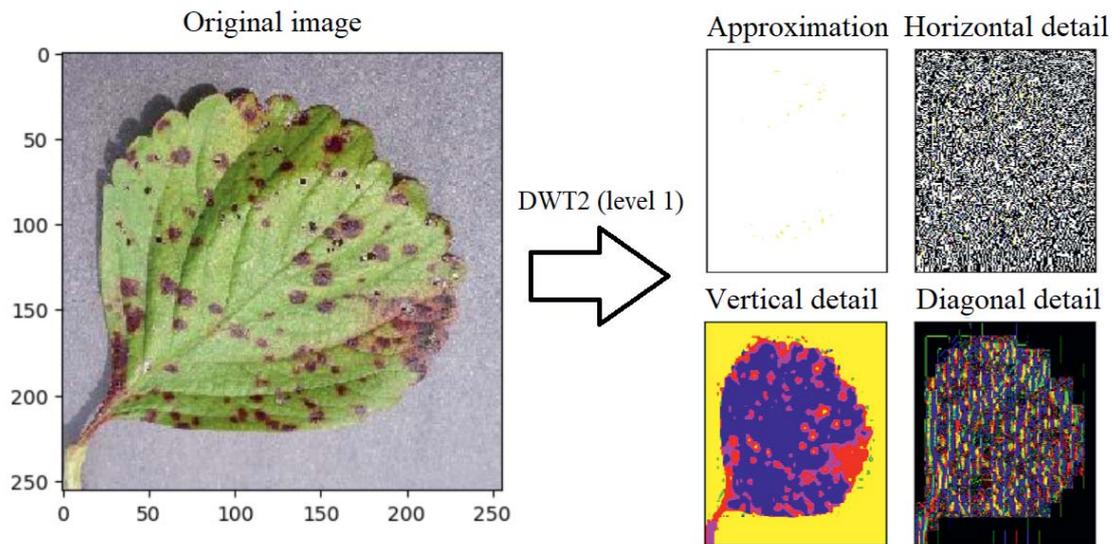


Рис. 4. Пример одноуровневого двумерного вейвлет-разложения исходного изображения
 Примечание: составлено авторами.

в CSV-файл средствами библиотеки Pandas языка Python (рис. 5).

Стоит также упомянуть другие модули и библиотеки Python, задействованные в данной работе:

Os – для работы с операционной и файловой системами (загрузка и инициализация набора данных);

OpenCV – для анализа изображений;

NumPy – для работы с многомерными массивами;

Matplotlib – для визуализации данных и вычислений;

PyWt – для вейвлет-вычислений;

Scikit-learn – для операций машинного обучения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Фактически датафрейм из рис. 5 представляет собой готовую для дальнейших вычислений и решения основной задачи базу данных признаков изображений. Входными данными для обучения нейронной сети будут являться значения признаков Харалика (все столбцы датафрейма, кроме последнего), выходными – последний столбец

features_db												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	135
0	4910.661102	5415.794556	4273.397919	29048.449310	29122.806091	29106.444092	1553.198120	2060.362946	1171.758636	1393.249298	...	0.020375
1	7303.758423	8427.883728	6236.064575	23997.235077	24021.615082	24051.146210	1490.319397	1115.246582	1598.354919	2341.404175	...	0.021991
2	4430.062317	4523.639435	3207.685944	31342.150543	31424.312653	31187.380554	2588.799622	5389.672791	2168.333527	1171.598816	...	0.031454
3	2486.059052	3068.871552	1756.565704	29658.216309	29714.896667	29592.967621	1630.973450	1723.165375	1520.119598	2698.978638	...	0.022097
4	2495.887024	3002.724609	1748.883606	29889.781281	29849.687653	29692.824524	1620.140015	1768.595612	1494.767761	2675.156372	...	0.022522
...
17595	1535.361542	1275.335602	1669.307983	32816.403412	33203.055695	33404.653168	3346.186890	3439.760468	693.740204	844.401672	...	0.023542
17596	2938.391449	3469.871307	1427.089050	20699.824158	21046.329041	22294.390381	1638.140228	2546.195953	436.153076	1110.063110	...	0.041534
17597	2976.249786	3380.340973	1314.810059	33047.073792	33249.885498	33173.229004	811.761047	2261.653107	458.613220	1446.747620	...	0.029648
17598	7692.713287	10451.721527	10453.655701	28285.653687	28356.335419	28304.653381	1385.866791	1878.329651	1318.927338	1372.675537	...	0.016805
17599	4373.335419	4887.719177	2555.983002	27060.069489	27138.666473	28001.021484	1659.912781	3139.970367	585.401855	717.408020	...	0.033401

17600 rows × 145 columns

Рис. 5. Текстурные признаки Харалика для исходного датасета
 Примечание: составлено авторами.

датафрейма с закодированными метками классов.

Следующим шагом является предварительная обработка данных.

Во-первых, это разделение на обучающую и тестовую выборки в оптимальном соотношении 70 к 30.

Во-вторых, стандартизация: некоторые характеристики имеют широкий диапазон значений и в процессе классификации могут создать систематическую ошибку. Вспомогательный класс **StandartScaler** масштабирует данные так, чтобы они имели нулевое среднее значение и единичную дисперсию ($\mu = 0$, $\sigma = 1$). Важно то, что здесь выполняется стандартизация лишь входных данных, поскольку выходные содержат только закодированные метки [6, 7].

В-третьих, уменьшение размерности, являющееся самым важным шагом предобработки. Оно улучшает скорость работы методов машинного обучения, снижает требования к памяти при минимальных информационных потерях. Одним из распространенных методов уменьшения размерности данных является метод главных компонент (principal component analysis, PCA). В библио-

теку Scikit-learn этот метод уже встроен, поэтому главной задачей становится правильный выбор количества главных компонент набора данных. Чтобы ее решить, нужно построить график зависимости параметра «Variance explained» от количества главных компонент (рис. 6).

Параметр «Variance explained» характеризует степень потери полезной информации о данных. Чем ближе он к 1, тем больше информации сохраняется для анализа [8].

Как можно заметить из рис. 6, уже при числе $N = 40$ компонент значение вариативности практически достигает единицы, так что именно этот показатель будет взят для дальнейших расчетов. Таким образом, с минимальными потерями удалось снизить размерность данных более чем в три раза (со 144 до 40 признаков).

Непосредственно классификация выполнялась двумя способами:

- классическим алгоритмом машинного обучения – логистической регрессией;
- базовой моделью искусственной нейронной сети – перцептроном.

Результаты приведены в сравнительной таблице.

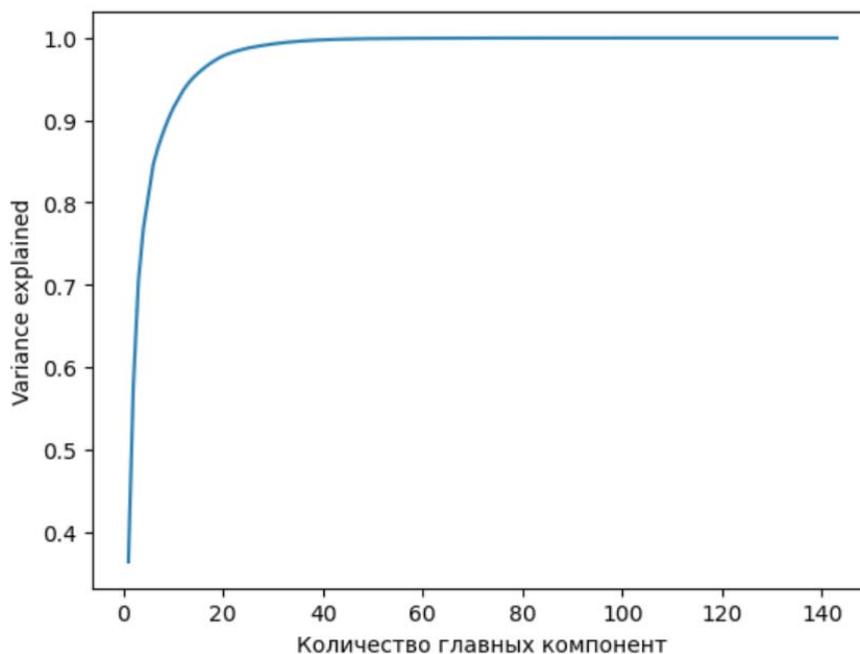


Рис. 6. График зависимости параметра «Variance explained» от числа главных компонент

Примечание: составлено авторами.

Результаты нейросетевой классификации

Метод классификации	Метрика			
	accuracy	precision	recall	f-score
Логистическая регрессия	88 %	0.88	0.87	0.87
Перцептрон	84 %	0.84	0.83	0.84

Примечание: составлено авторами.

Как можно видеть из таблицы, благодаря комбинированию методов текстурного анализа и машинного обучения удалось достичь высоких показателей точности – до 88 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен алгоритм многоклассовой классификации состояния растений с использованием текстуры изображений, от-

личающийся совокупным применением методов вейвлет-анализа и машинного обучения, что позволило достичь хороших результатов (до 88 % точности).

Перспективы совершенствования предложенного метода могут включать выбор наиболее оптимального типа вейвлет-преобразования и классификационного метода машинного обучения.

Список источников

1. Vyas A., Paik J. Review of the application of wavelet theory to image processing. *IEIE Transactions on Smart Processing & Computing*. 2016;5(6):403–417.
2. Балаганский А. Ю., Гребеньков А. А. Вейвлет-преобразование для обработки изображений системы управления отоплением с применением методов машинного обучения // Информатика и образование: границы коммуникаций. 2022. № 14. С. 147–150.
3. Мельникова Ю. С. Анализ и обработка медицинских изображений с помощью метода вейвлет-анализа в ветеринарии // Фундаментальные и прикладные исследования в информатике и цифровизации : материалы симпозиума XVIII (L) Международ. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, приуроченной к 50-летию КемГУ, 26 апреля 2023 г., г. Кемерово. Кемерово : Кемеровский государственный университет, 2023. С. 138–141.
4. Alekseev V. V., Kaliakin I. V. The role of sampling rate in wavelet transform decomposition. In: *Proceedings of the XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements SCM 2016*, May 25–27, 2016, Saint Petersburg. St. Petersburg; 2016. p. 392–394.
5. Ковалева И. Л. Текстурные признаки изображений. Минск : Белорусский национальный технический университет, 2010. 26 с.
6. Предварительная обработка данных. URL: <https://scikit-learn.ru/6-3-preprocessing-data/> (дата обращения: 25.12.2023).
7. Как писать преобразователи данных в Sklearn. URL: <https://habr.com/ru/companies/skillfactory/articles/675876/> (дата обращения: 25.12.2023).
8. Kumar A. PCA Explained Variance Concepts with Python Example. 2023. URL: <https://vitalflux.com/pca-explained-variance-concept-python-example/> (дата обращения: 27.12.2023).

References

1. Vyas A., Paik J. Review of the application of wavelet theory to image processing. *IEIE Transactions on Smart Processing & Computing*. 2016;5(6):403–417.
2. Balagansky A. Yu., Grebenkov A. A. Wavelet transformation for image processing of a heating control system using machine learning methods. *Informatsiia i obrazovanie: granitsy kommunikatsii*. 2022;(14):147–150. (In Russian).
3. Melnikova Yu. S. Analiz i obrabotka meditsinskikh izobrazhenii s pomoshchiu metoda veivlet-analiza v veterinarии. In: *Proceedings of the Symposium of the XVIII (L) International Scientific Conference for Students, Postgraduates and Young Scientists devoted to the 50th Anniversary of Kemerovo State University “Fundamentalnye i prikladnye issledovaniia v informatike i tsifrovizatsii”*, April 26, 2023, Kemerovo. Kemerovo: Kemerovo State University; 2023. p. 138–141. (In Russian).
4. Alekseev V. V., Kaliakin I. V. The role of sampling rate in wavelet transform decomposition. In: *Proceedings of the XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements SCM 2016*, May 25–27, 2016, Saint Petersburg. St. Petersburg; 2016. p. 392–394.
5. Kovaleva I. L. Teksturnye priznaki izobrazhenii. Minsk: Belarusian National University of Technology; 2010. 26 p. (In Russian).
6. Predvaritelnaia obrabotka dannykh. URL: <https://scikit-learn.ru/6-3-preprocessing-data/> (accessed: 25.12.2023). (In Russian).
7. Kak pisat preobrazovateli dannykh v Sklearn. URL: <https://habr.com/ru/companies/skillfactory/articles/675876/> (accessed: 25.12.2023). (In Russian).
8. Kumar A. PCA Explained Variance Concepts with Python Example. 2023. URL: <https://vitalflux.com/pca-explained-variance-concept-python-example/> (accessed: 27.12.2023).

Информация об авторах

В. В. Брыкин – аспирант.

М. Я. Брагинский – кандидат технических наук,
доцент.

Д. В. Тараканов – кандидат технических наук, до-
цент.

И. О. Тараканова – аспирант, ассистент.

Information about the authors

V. V. Brykin – Postgraduate.

M. Ya. Braginsky – Candidate of Sciences (Engineer-
ing), Docent.

D. V. Tarakanov – Candidate of Sciences (Engineer-
ing), Docent.

I. O. Tarakanova – Postgraduate, Assistant Professor.

Научная статья
УДК 004.491
DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-4

МОДЕЛЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ АГРЕССИВНЫХ ПРОГРАММНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Ангелина Игоревна Дубровина¹✉, Теймур Имран Оглы Акперов²,
Татьяна Сергеевна Александрова³

^{1, 2, 3}Южный университет (ИУБиП), Ростов-на-Дону, Россия

¹Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ministrelia69@yandex.ru ✉, <https://orcid.org/0009-0005-8562-9389>

²iakperov80@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-5028-6975>

³tanysa08@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9852-0423>

Аннотация. Рассмотрены вопросы моделирования вычислительных процессов, позволяющих оценить потенциальные возможности используемых программных средств по негативному влиянию на работу различных видов человеко-машинных систем, в том числе обладающих признаками искусственного интеллекта. В ходе численного эксперимента анализировались программы, предоставляющие интеллектуальную поддержку роботам-ассистентам преподавателей и реализующие определенные функции в вычислительном комплексе «умного дома», с учетом их агрессивного поведения. Обсужден ряд вопросов, связанных с результатами этого эксперимента. Показан подход, позволяющий выделить группу операторов машинного языка программирования, имеющих потенциал для формирования программных закладок общего и специального видов, влияющих на информационную экологию и корректную работу компонентов «умного дома». Даны рекомендации по формированию набора признаков агрессивности в зависимости от специфики применения конкретных программных средств.

Ключевые слова: разрушающее программное средство, программная закладка, агрессивный элемент, идентификация, безопасность

Для цитирования: Дубровина А. И., Акперов Т. И., Александрова Т. С. Модель идентификации агрессивных программных элементов // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 1. С. 31–36. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-4.

Original article

A MODEL DETECTING AGGRESSIVE SOFTWARE ELEMENTS

Angelina I. Dubrovina¹✉, Teimur I. Akperov², Tatyana S. Aleksandrova³

^{1, 2, 3}Southern University (IMBL), Rostov-on-Don, Russia

¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

¹ministrelia69@yandex.ru ✉, <https://orcid.org/0009-0005-8562-9389>

²iakperov80@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-5028-6975>

³tanysa08@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9852-0423>

Abstract. The article examines issues of modeling computation processes that help assess the probable capabilities of the software used to negatively affect the operation of various types of human-machine systems, including those with artificial intelligence. Given its aggressive behavior, a numerical experiment analyzed software that provides intelligent support to assistant robots for teaching staff and implements certain functions in the smart home's computation complex. The experiment's findings raise a number of issues, which are discussed. The study demonstrates an approach for highlighting a set of machine programming language statements capable of producing general and special software bugs that affect the information environment

and appropriate operation of smart home components. Guidelines for grouping a set of aggressive properties are given based on the specifics of the software in use.

Keywords: destructive software tool, software bug, aggressive element, identification, security

For citation: Dubrovina A. I., Akperov T. I., Aleksandrova T. S. A model detecting aggressive software elements. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(1):31–36. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-4.

ВВЕДЕНИЕ

Определение агрессивных программных элементов в исследуемом программном средстве может быть осуществлено с помощью некоторой семантической модели, ориентированной на интерпретацию общих свойств программ, предположительно содержащих разрушающие функции. Основной задачей, решаемой такой моделью разрушающего программного средства (РПС), является выявление состояния вычислительного процесса, нарушающего безопасность и целостность программной среды в результате выполнения программы или отдельных ее участков. Кроме того, следует выделить и ряд дополнительных задач, способствующих решению основной задачи:

- 1) определение аномалий потока управления: «мертвого» (неисполняемого) [1] кода;
- 2) определение аномалий потока данных: побочного эффекта функций программного средства – изменения значений глобальных переменных в подпрограммах [1, 2], неинициализированных переменных.

Исходя из специфики задач будем использовать конструктивный подход в теории семантики языков программирования. В соответствии с конструктивной точкой зрения язык определяется тем действием, которое он оказывает на машину, т. е. языком называется множество таких программ, выполнение которых на машине имеет совершенно определенные последствия. Построим семантическую модель анализа программы, используя основные идеи Венского метода, разработанного сотрудниками Венской лаборатории фирмы IBM [3].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Введем основные соглашения и обозначения.

В общем случае будем использовать символы для обозначения следующих компонент программы:

x – переменные;

v – выражения;

b – логические выражения;

Q – операторы;

C – списки операторов.

Пусть X – множество всех возможных переменных, а Z – множество всех возможных значений переменных. Каждое из них может быть конечным или счетным. Неопределенное значение Λ также принадлежит Z : $\Lambda \in Z$.

Состояние памяти s определим как конечную функцию из X в Z . Множество всех значений памяти обозначим через S , а его элементы – символами s, s_1 и т. д. Множество S включает три подмножества состояний: S_n, S_n^*, S^* – соответственно легитимное, нелегитимное и неустойчивое состояние (одновременное присутствие S_n и S_n^*).

Введем частичную функцию change :

$$\text{Change}: S \times X \times Z \rightarrow S,$$

такую, что для всех s, s_1, x и z :

$$s_1 = \text{change}(s, x, z) \equiv s_1(x) = z \ \& \ s =^* s_1.$$

Функция change описывает эффект изменения значения переменной $x = z$, когда машина находится в состоянии s . Эффект заключается в том, что переменной x теперь приписывается значение z , а значения остальных переменных не изменяются.

Семантическую структуру каждого оператора q представим в виде:

$$q = \{f_i; x_1, \dots, x_n; y_1, \dots, y_m\}, \quad (1)$$

где f_i – одна из следующих функций (тип оператора):

function q :

$x := v \rightarrow f_1(x, v)$;

$b * q \rightarrow f_2(b, q)$;

$(C) \rightarrow f_3(C)$.

f_1, f_2, f_3 – выражения, определяющие желаемый результат в каждом случае;

x_1, x_2, \dots, x_n – множество переменных, получающих новые значения при выполнении оператора q ;

y_1, y_2, \dots, y_m – множество переменных, используемых в операторе q и не изменяющих своего значения.

Условное выражение b может быть записано в виде:

$$\begin{aligned} (b \rightarrow \dots \\ d \rightarrow \dots). \end{aligned}$$

Если b – истина, то результат берется из первой строчки, а в противном случае – из второй. Пустой оператор обозначим как Ω .

Опишем процесс вычисления программы в терминах модели-вычислителя [4, 5]. В этой модели состояние машины не включает состояние «управление» как в модели-интерпретаторе. Состояние «управление», представляющее собой список операторов, которые предстоит выполнить после q , не влияет на семантику состояния s_i , получаемого в результате выполнения q . Модель определяется заданием функции, отображающей программу в ее вычислении. Под вычислением понимается конечная последовательность состояний памяти. Функция имеет следующий вид:

$$\text{comp}: S \times Q \rightarrow S^* \quad (S^* = S_n \cup S_n \cup S^*) \quad (2)$$

$$\text{comp}: (s, Q) =$$

function Q :

$$\Lambda \rightarrow (s')$$

$$x: = v \rightarrow (s; \text{change}(s, x, v_s))$$

$$b * q \rightarrow (b_s \rightarrow \text{comp}(s, Q),$$

$$d \rightarrow (s))$$

$$(C) \rightarrow \text{comp}(s, C)$$

$$\Omega \rightarrow (s).$$

Модель-вычислитель является основой построения операционной семантики языков программирования. Операционная семантика задается, как уже было показано, определением абстрактного «состояния машины» и смыслом конструкций языка с точки зрения их влияния на состояние, т. е. функции переходов из состояния в состояние:

$$\text{Comp}: S \rightarrow S.$$

Уточним содержание понятия состояния памяти. S представляет собой вектор состояния, определяемый совокупностью множеств

переменных X . В нашем случае вектор состояния S выглядит следующим образом:

$$S = \{X_d, X_3, X_n, X_n\},$$

где $X_d = \{x_{d1}, x_{d2}, \dots, x_{dn}\}$ – множество контролируемых глобальных системных переменных по критерию доступа (системные адреса, таблицы данных и т. п.);

$X_3 = \{x_{31}, x_{32}, \dots, x_{3m}\}$ – множество контролируемых глобальных системных переменных по критерию запуска (значения системных регистров, размера свободной оперативной и виртуальной памяти, появления дополнительных переменных программы и т. п.);

$X_n = \{x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nw}\}$ – множество контролируемых глобальных системных переменных по критерию использования ресурсов среды;

$X_n = \{x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nr}\}$ – множество переменных программы.

Операционное определение исследуемой программы дадим в терминах функции Comp от двух аргументов – текста программы и вектора состояния, представляющего текущее состояние вычислений. Кроме того, введем дополнительно следующие функции:

1. Znach , дающая значение выражения, соответствующего текущему состоянию: $\text{Znach}: S \times V \rightarrow Z$;

2. End , дающая заключительный вектор состояния конечной последовательности состояний.

Подстановку значения в вектор состояния будем записывать следующим образом: если z – это значение, то вектор состояния $s [x \leftarrow z]$ определяется как:

$$s [x \leftarrow z] \{x\} = z,$$

$$s [x \leftarrow z] \{y\} = s(y) \text{ для всех } y \neq x.$$

Смысл записи – «присвоить компоненте x вектора s значение z ».

Функция Comp определяется для каждого из типов f_i операторов:

$$\text{Comp}(x: = v, s) = s [x \leftarrow \text{Znach}(v, s)]; \quad (3)$$

$$\text{Comp}(s_n, s_n; s) = \text{Comp}(s_n, s) \parallel \text{Comp}(\text{Comp}(s_n, s), s);$$

$$\text{Comp}(s_1; s_2, s) = \text{Comp}(s_1, s) \parallel \text{Comp}(s_2, \text{End}(\text{Comp}(s_1, s))),$$

где \parallel используется для обозначения конкатенации последовательностей состояний.

Использование функцией Comp векторов состояний позволяет достаточно просто описать процесс функционирования программного средства.

Таким образом, основное преимущество операционной модели заключается в том, что операционное определение семантики программы может дать приемлемую реализацию [5, 6].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Цель эксперимента: идентификация конструкций, характерных для разрушающих программных средств с последующим формированием множества первичных признаков РПС.

В основе эксперимента лежит гипотеза о том, что разрушающие программные средства и обычные программы отличаются между собой по частоте использования некоторых конструкций применяемого языка программирования [7, 8], характерного для человеко-машинных систем, например систем «умный дом», систем оценки уровня информационной экологичности информации в учебном процессе [8] и т. д. Исходя из специфики функций, выполняемых РПС, часть операторов и служебных идентификаторов (операндов), отвечающих за их реализацию, редко используется при написании обычных программ. При этом под обычными программами здесь будем понимать программы, не выполняющие совокупность

указанных выше разрушающих функций и не имеющих механизмов исследования и маскировки в программной среде. Выявление такого различия позволяет определить первичные признаки РПС в программах, ориентируясь на которые можно повысить эффективность поиска, при этом получая минимальные временные затраты. От определения множества первичных признаков зависит результат идентификации разрушающих функций в программе.

План проведенного эксперимента:

1. Выбор языка программирования, конструкции которого будут контролироваться в процессе анализа программ.

2. Получение статистики применения операторов в программах на заданном множестве разрушающих программных средств и случайной выборки обычных программ.

3. Обработка результатов анализа программ.

4. Формирование множества первичных признаков – операторов программ.

Результаты выполнения программы характеризует гистограмма (рисунок), отображающая среднее арифметическое частот реализации тех операторов, которые наиболее часто встречались в РПС по сравнению с обычными программами.

Столбцы диаграммы темного цвета характеризуют результаты эксперимента на множестве разрушающих программных средств. Столбцы светлого тона – соответственно ре-

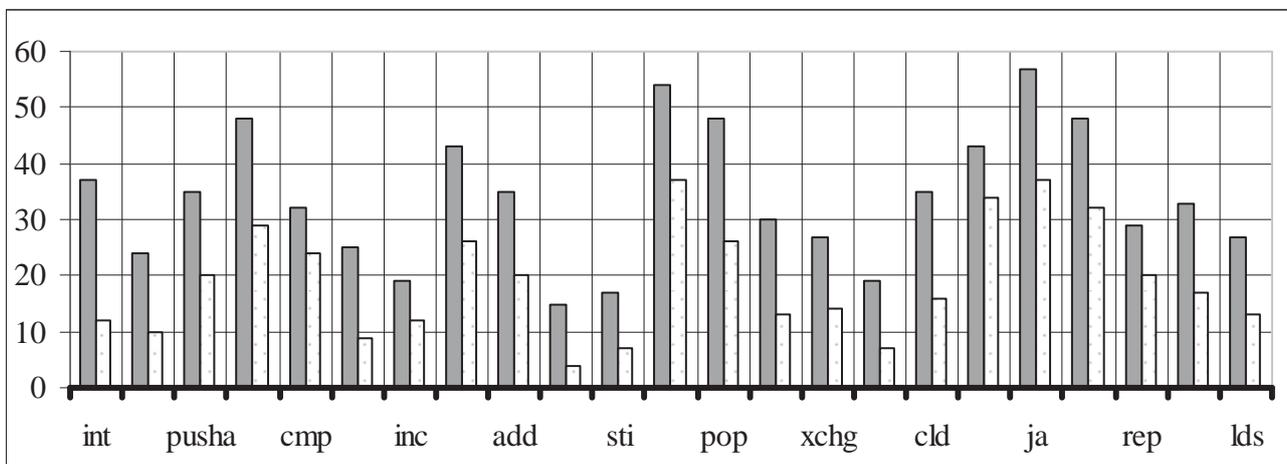


Рисунок. Результаты эксперимента

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

зультаты эксперимента на обычных программных средствах.

Таким образом, эксперимент подтвердил предположение из [9] о том, что существует различие в реализации на операторном уровне между разрушающими программными средствами и обычными программами. Следует полагать, что данные операторы являются основой построения разрушающих программных конструкций и могут быть использованы в качестве «опорных» точек в методике идентификации программных закладок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанная методика идентификации программных закладок позволяет определять в исходных текстах программ

неизвестные разрушающие функции (агрессивные программные элементы) на основе описанной логической системы распознавания.

2. Предложенные методы семантического анализа программы, ее моделирования в рамках квантового представления являются универсальными с точки зрения стилистики программ, их реализации на любых языках программирования, особенностей ВС.

3. Эксперимент с контрольной группой разрушающих программных средств позволил сформировать множество первичных признаков РПС и показал отличительные особенности реализации разрушающих функций в РПС.

Список источников

1. Акперов И. Д., Храмов В. В., Горбачева А. А. и др. Информационная безопасность и защита информации в цифровой экономике: элементы теории и тестовые задания. Ростов н/Д. : Южный университет (ИУБиП), 2020. 114 с.
2. Арапова Е. А., Бочаров А. А., Вострокнутов И. Е. и др. Возможности искусственного интеллекта в совершенствовании информационного образовательного пространства регионов России : моногр. М. : ООО «Издательский Центр РИОР», 2022. 140 с.
3. Храмов В. В. Особенности использования принципа информационного следа при поиске программных закладок // Вопросы защиты информации. 2001. № 3. С. 39–40.
4. Храмов В. В., Трубников А. Н. Модель специальной программной закладки // Вопросы защиты информации. 1998. № 1–2. С. 36–37.
5. Akperov I. G., Akperov G. I., Alekseichik T. V. et al. Soft models of management in terms of digital transformation. Vol. 2. Monograph. Rostov-on-Don: PEI HE SU (IUBIP); 2020. 256 p.
6. Линденбаум Т. М., Попов О. Р., Храмов В. В. Введение в информационную экологию: технологические предпосылки // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практич. конф., 09–11 ноября 2020 г., г. Ростов-на-Дону. Ростов н/Д. : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2020. С. 136–139.
7. Khramov V. V., Trubnikov A. N. Analysis of the aggressiveness of a software product. *Automatic Control and Computer Sciences*. 1999;33(2):28–34.
8. Khramov V. V. Development of a human-machine interface based on hybrid intelligence. *Modern Informa-*

References

1. Alekperov I. D., Khramov V. V., Gorbacheva A. A. et al. Informatsionnaia bezopasnost i zashchita informatsii v tsifrovoi ekonomike: elementy teorii i testovye zadaniia. Rostov-on-Don: Southern University (IMBL); 2020. 114 p. (In Russian).
2. Arapova E. A., Bocharov A. A., Vostroknutov I. E. et al. Vozmozhnosti iskusstvennogo intellekta v sovershenstvovanii informatsionnogo obrazovatel'nogo prostranstva regionov Rossii. Monograph. Moscow: RIOR Publishing; 2022. 140 p. (In Russian).
3. Khramov V. V. Osobennosti ispolzovaniia printsipa informatsionnogo sleda pri poiske programmnykh zakladok. *Information Security Questions*. 2001;(3):39–40. (In Russian).
4. Khramov V. V., Trubnikov A. N. Model spetsialnoi programmnoi zakladki. *Information Security Questions*. 1998;(1–2):36–37. (In Russian).
5. Akperov I. G., Akperov G. I., Alekseichik T. V. et al. Soft models of management in terms of digital transformation. Vol. 2. Monograph. Rostov-on-Don: PEI HE SU (IUBIP); 2020. 256 p.
6. Lindenbaum T. M., Popov O. R., Khramov V. V. Introduction to information ecology: Technological background. In: *Proceedings of the International Research-to-Practice Conference "Aktualnye problemy i perspektivy razvitiia transporta, promyshlennosti i ekonomiki Rossii"*, November 9–11, 2020, Rostov-on-Don. Rostov-on-Don: Rostov State Transport University; 2020. p. 136–139. (In Russian).
7. Khramov V. V., Trubnikov A. N. Analysis of the aggressiveness of a software product. *Automatic Control and Computer Sciences*. 1999;33(2):28–34.
8. Khramov V. V. Development of a human-machine interface based on hybrid intelligence. *Modern Informa-*

tion Technologies and IT-Education. 2020;16(4):893–900.

9. Храмов В. В., Горбачева А. А., Фомичев Д. П. Моделирование недеklarированной активности программного средства в условиях нечеткости исходных данных // Информационная безопасность: вчера, сегодня, завтра : сб. ст. по материалам III Междунар. науч.-практич. конф., 23 апреля 2020 г., г. Москва. М. : Российский государственный гуманитарный университет, 2020. С. 124–130.

Информация об авторах

А. И. Дубровина – аспирант.

Т. И. Акперов – аспирант.

Т. С. Александрова – аспирант.

tion Technologies and IT-Education. 2020;16(4):893–900.

9. Khramov V. V., Gorbacheva A. A., Fomichev D. P. Modeling of unclaimed activity of the software under the conditions of fuzzy background. In: *Proceedings of the 3rd International Research-to-Practice Conference “Infomatsionnaia bezopasnost: vchera, segodnia, zavtra”*, April 23, 2020, Moscow. Moscow: Russian State University for the Humanities; 2020. p. 124–130. (In Russian).

Information about the authors

A. I. Dubrovina – Postgraduate.

T. I. Akperov – Postgraduate.

T. S. Aleksandrova – Postgraduate.

Научная статья

УДК 004.62:658.5

DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-5

АЛГОРИТМ ВЫЯВЛЕНИЯ ФАКТОРОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ СФЕРЫ УСЛУГ

Алсу Винировна Курамшина¹, Светлана Александровна Лысенкова²✉

^{1,2}Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹kuramshina_av@surgu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9891-4959>

²lysenkova_sa@surgu.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-1007-7610>

Аннотация. Причина изучения категории «эффективность» обусловлена множественностью подходов, методов, видов дефиниции и интерпретацией в различных сферах; возможностями и трудностями в процессе принятия решений; влиянием субъективных факторов в отдельных подходах и методах. Это позволяет осуществлять поиск возможностей повышения эффективности деятельности предприятия сферы услуг с помощью разработки информационной системы, спроектированной на основе алгоритма выявления значимых факторов. Целью исследования является разработка алгоритма выявления факторов, позволяющих повысить эффективность деятельности предприятия.

Для решения проблемы разработан алгоритм выявления факторов повышения эффективности деятельности предприятия сферы услуг. В основу положены процессы сбора, обработки данных Федеральной службы государственной статистики по факторам, ограничивающим деятельность организаций этого вида деятельности; по показателям, отражающим деятельность в динамике. Используются результаты экспертного опроса, объединяющего пять подходов к оценке эффективности и учитывающего специфику изучаемого вида деятельности.

Ключевые слова: алгоритм, факторы, показатели, эффективность, сфера услуг, информационная система

Для цитирования: Курамшина А. В., Лысенкова С. А. Алгоритм выявления факторов повышения эффективности деятельности предприятия сферы услуг // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 1. С. 37–46. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-5.

Original article

AN ALGORITHM FOR DETECTING FACTORS OF RISE IN THE PERFORMANCE EFFICIENCY OF A SERVICE-ORIENTED ENTERPRISE

Alsu V. Kuramshina¹, Svetlana A. Lysenkova²✉

^{1,2}Surgut State University, Surgut, Russia

¹kuramshina_av@surgu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9891-4959>

²lysenkova_sa@surgu.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-1007-7610>

Abstract. The reason behind studying the category of efficiency lies in the number of approaches, methods, types of definitions, interpretations in various fields; possibilities and challenges in decision-making; and the influence of subjective factors in particular approaches and methods. All of this enables the search for ways to improve the performance efficiency of a service-oriented enterprise by developing an information system with an algorithm for detecting significant factors. The study aims to develop an algorithm for detecting factors that can help an enterprise to improve its efficiency.

An algorithm for detecting factors that increase the performance efficiency of a service-oriented enterprise was developed to solve the problem. The algorithm is based on data collected and processed by the Federal State Statistics Service on factors that limit the operation of such enterprises and indicators that dynamically demonstrate their performance. The expert survey findings, which included five approaches to assessing efficiency and considering the specificity of such activity, were applied.

Keywords: algorithm, factors, indicators, efficiency, service industry, information system

For citation: Kuramshina A. V., Lysenkova S. A. An algorithm for detecting factors of rise in the performance efficiency of a service-oriented enterprise. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(1):37–46. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-5.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство организаций сферы услуг – это предприятия малого и среднего бизнеса, которые, принимая и реализуя управленческие решения, используют множество информационных средств. Поэтому для их эффективной деятельности необходима не просто информационная система, а отражающая индивидуальные особенности предприятия и упрощающая процесс принятия управленческого решения. Данные Федеральной службы государственной статистики говорят о весьма низких показателях цифровизации, особенно в сфере малого и среднего бизнеса, и это дает возможность сделать вывод, что многие предприятия как потребительского рынка в целом, так и сферы услуг в частности не используют возможности адекватно сформированной информационной системы. Интересной гипотезой является возможность повысить эффективность деятельности предприятия сферы услуг с помощью разработки и внедрения информационной системы. В условиях разнообразия информационных средств, зачастую сложных для понимания современными предпринимателями, данная проблема обостряется. Изучение критериев и показателей эффективности деятельности предприятия сферы услуг и разработка алгоритма выявления этих факторов является значимой и своевременной задачей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эффективность информационной системы определяется теми бизнес-процессами, которые осуществляются в организации. Стоит отметить многообразие взглядов на дефиницию «бизнес-процесс», так как процессный подход и понятие процесс используется в эко-

номике, управлении, информационных системах. В частности, С.Е. Куклев, изучая категорию «бизнес-процесс» [1, с. 46], говорит о ней как о целенаправленной, устойчивой, структурированной, регулируемой последовательности действий, которая преобразует ресурсы в результаты, востребованные потребителем.

Для проектирования эффективной информационной системы необходимо выделить значимые факторы, влияющие на бизнес-процессы организации; определиться с критериями, подходами, методами, выбрав оптимальные из многообразия, сформировавшегося в теории принятия решений. Каждый подход, критерий и метод имеет свои особенности, трудности и возможности, которые влияют на субъективный выбор лица, принимающего решения. Все это предопределяет необходимость разработки алгоритма выявления значимых факторов для повышения эффективности предприятий в сфере услуг.

При сопоставлении результатов разных методических подходов возникает возможность получить комплексную оценку факторов, рассчитать интегральные параметры, влияющие на эффективность, и, как итог, сформировать эффективную информационную систему.

Таким образом, алгоритм основан на процессе сбора, обработки и факторного анализа данных Федеральной службы государственной статистики по факторам, ограничивающим деятельность сферы услуг; показателям, характеризующим сферу услуг. Произведена систематизация подходов к оценке эффективности, которая заложена в основу формирования вопросов экспертного опроса. Экспертный опрос, проведенный в ходе ис-

следования, позволил обобщить факторы, выявить дополнительные и осуществить их интеграцию. Дальнейшая обработка данных факторов и факторный анализ позволили выявить наиболее значимые.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Содержание алгоритма выявления значимых факторов

Комплексная оценка влияния факторов на эффективность деятельности организации сферы услуг может складываться из следующих составляющих (рис. 1).

1.1. Обработка первого блока данных, можно назвать объективной оценкой. В данном блоке исследования собираются и обрабатываются данные Федеральной службы государственной статистики по факторам, ограничивающим сферу услуг. Выбор адекватных параметров конкретного вида деятельности будет определяться лицом, принимающим решение, и субъективизма здесь избежать достаточно сложно.

Последовательность действий для объективной оценки будет складываться из следующих этапов:

- определение иерархической структуры и номенклатуры факторов;
- определение критериев оценки;
- определение значений;

– выбор определяющих факторов.

1.2. Обработка второго блока данных, также можно назвать объективной оценкой. Стоит отметить множество видов эффективности, критериев и показателей, ее характеризующих. Выбор адекватных параметров в оценке эффективности предприятия конкретного вида деятельности будет определяться лицом, принимающим решение, и субъективизма здесь тоже избежать достаточно сложно.

Последовательность действий для объективной оценки будет складываться из следующих этапов:

- определение иерархической структуры и номенклатуры показателей;
- определение критериев оценки;
- определение значений;
- выбор определяющих показателей/индикаторов.

1.3. Обработка результатов экспертного опроса является субъективной оценкой. Однако грамотно составленные вопросы, подобранная группа экспертов, организация опроса и его обработка помогут выделить определяющие факторы. Таким образом, разработка алгоритма экспертного опроса позволит получить значимые факторы, влияющие на эффективность деятельности организации сферы услуг. Современные условия позволяют

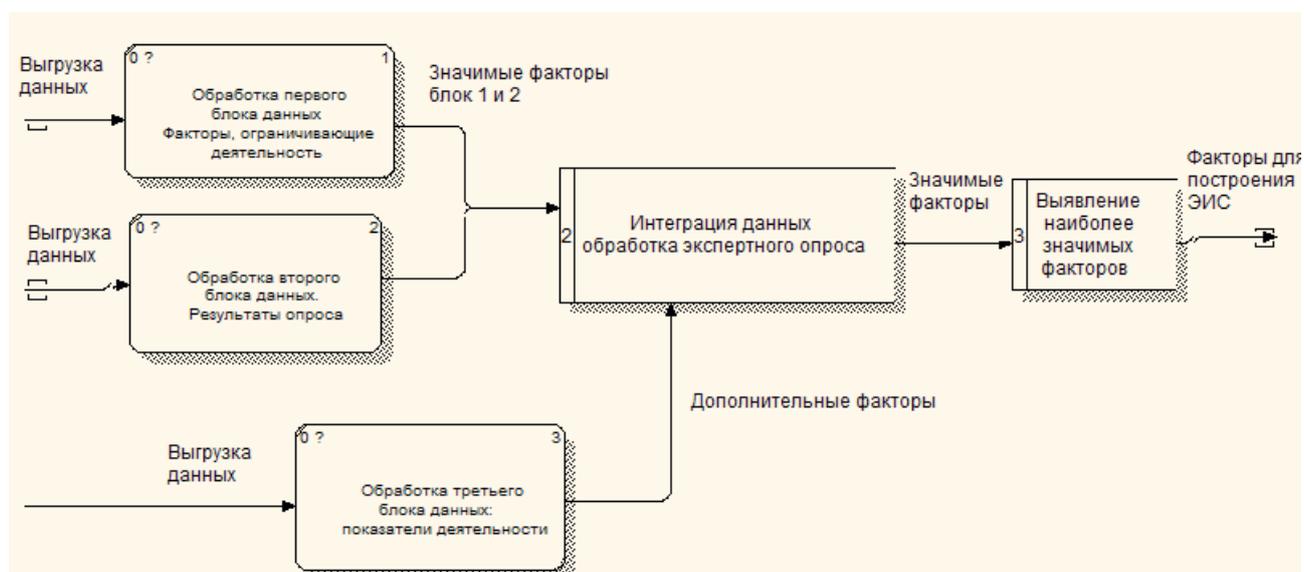


Рис. 1. Алгоритм выявления факторов, позволяющих повысить эффективность деятельности (нотация IDEF0)

Примечание: составлено авторами.

с помощью форсайтов осуществлять прогнозирование видов деятельности, отраслей, привлекая тысячи экспертов.

Последовательность действий для субъективной оценки будет складываться из следующих этапов:

- определение вида анкеты и метода проведения опроса;
- подбор экспертов-респондентов;
- определение последовательности вопросов;
- проведение анкетирования;
- обработка полученных результатов;
- выбор определяющих факторов.

Существенным моментом является механизм не только сбора, но и обработки данных. В выборе определяющих факторов целесообразным будет работа с открытыми данными/с big data и их обработка с помощью языка программирования, например Python. Современные технические возможности позволяют не только быстро проводить экспертные опросы и их обрабатывать, но и получать большие массивы данных по исследуемым вопросам. Такие массивы данных сегодня представлены по многим видам деятельности в различных источниках, в том числе данные Федеральной службы государственной статистики, open data, представленные на сайте Правительства РФ, на сайтах министерств и ведомств, администраций регионов, Всемирного банка и пр.

Последовательность действий для оценки будет складываться из следующих этапов:

- подбор открытых данных по факторам, определяющим эффективность деятельности организации сферы услуг;
- подготовка данных;
- обработка данных с помощью языка программирования Python;
- выбор определяющих факторов.

Этот блок позволяет не только собрать, обработать данные и провести анализ для выявления значимых факторов, но и интегрировать выделенные существенные факторы первых двух блоков.

На рис. 2 представлен алгоритм выявления значимых факторов (блок-схема).

2. Данные и методы, позволяющие осуществить выбор факторов

Большие данные – ключевой ресурс для бизнеса: их используют в IT, ретейле, финансах, здравоохранении, игровой индустрии, киберспорте, телекоме, маркетинге. В исследовании вопрос сбора, обработки и анализа данных является первичным и требует особого внимания, так как, по отзывам, занимает до 90% времени при осуществлении проекта [2]. Поэтому аналитик данных (Data Analyst) – это одна из востребованных профессий. В частности, Skillfactory media, описывая самые востребованные IT-профессии 2024 г., называет ее как одну из самых востребованных IT-профессий в 2022 г. [3]. Такой специалист анализирует большие данные: собирает и обрабатывает их, строит гипотезы, визуализирует результаты. В 2021 г. спрос на дата-аналитиков вырос на 222%. В июне 2021 г. на сайте hh.ru было более 5450 вакансий для аналитика данных [4]. Динамика объемов данных в интернете представлена в табл. 1.

Как видно из табл. 1, большие данные сегодня являются одним из самых быстрорастущих сегментов экономики. Так, за пять лет его объем вырастет еще как минимум в два раза и к 2026 г. составит уже 450 млн долл. Ассоциация больших данных оценивает рост этого рынка на 12% ежегодно в России. Главным фактором (в России и на мировом рынке) являются крупные компании [5].

В основе исследования лежат данные открытого доступа. Сейчас в открытом доступе есть большое количество баз данных, содержащих самые разнообразные сведения. Достаточно много ресурсов являются источниками больших данных, примеры приведены на рис. 3.

Федеральная служба государственной статистики представлена во всех субъектах Российской Федерации, главной ее задачей является удовлетворение потребностей органов власти и управления, средств массовой информации, населения, научной общественности, коммерческих организаций и пред-

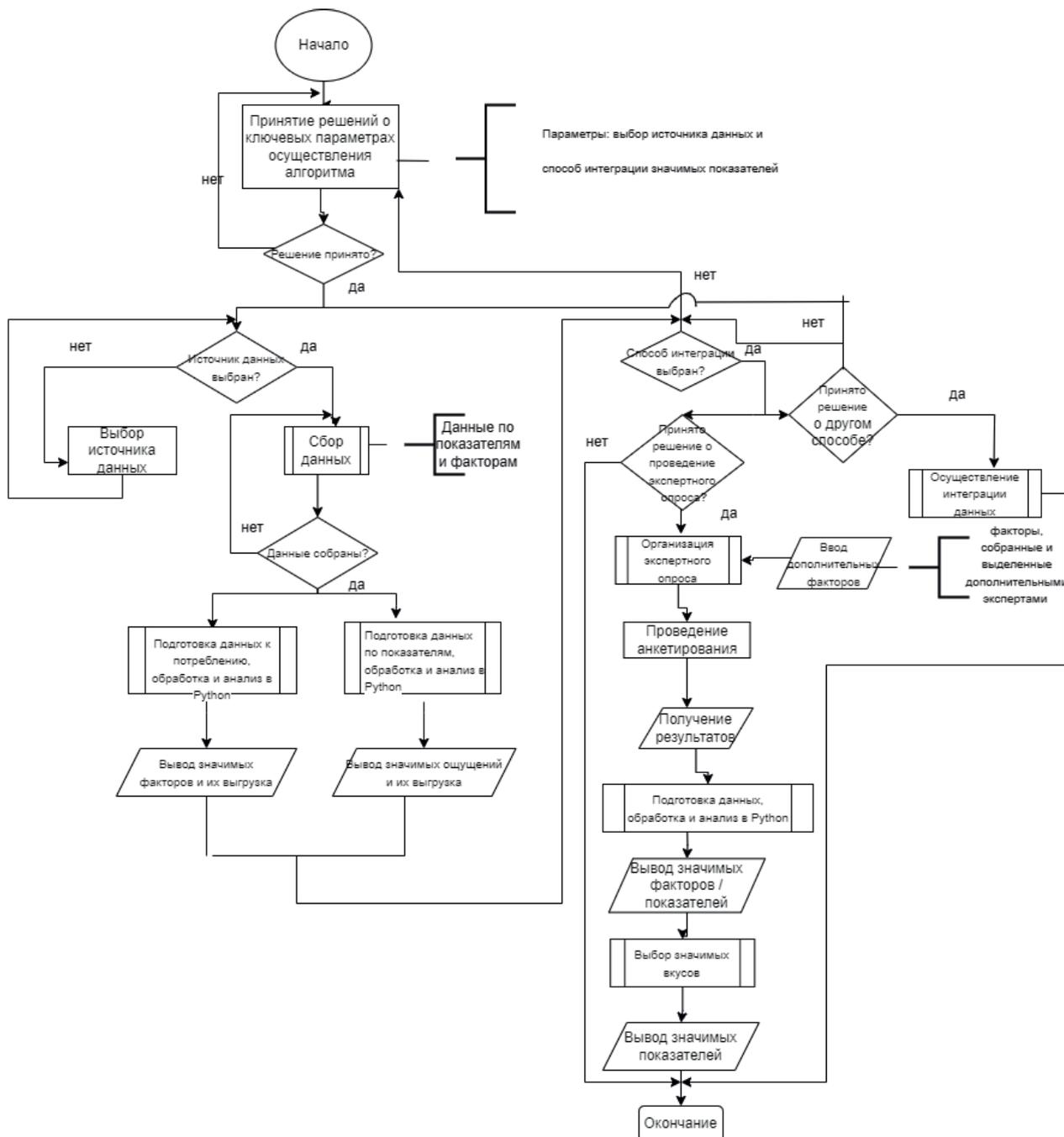


Рис. 2. Алгоритм выявления факторов, влияющих на повышение эффективности деятельности предприятия сферы услуг

Примечание: составлено авторами.

Таблица 1

Объемы данных в интернете

Годы	2008	2011	2020	2025
Объем данных в интернете, зеттабайт	0,18	1,76	59	< 200

Примечание: составлено по [5].

База данных Всемирного банка

- содержит годовые значения на 2015 г. 331 показателя стран мира за период с 1960 по 2014 г. в форматах HTML, XLS и XML, на 2022 г. Доступно 5 447 наборов данных [6]

Портал открытых данных Российской Федерации

- содержит более 4,1 тыс. наборов данных на 2015 г. и 26 992 набора данных на 2022 год. Принцип открытости получил отдельное название – «открытые данные» (Open Data) [7]

Федеральная служба государственной статистики

- содержит объем выходной информации – более 20 млрд единиц, 66 территориальных органов государственной статистики [8]

Рис. 3. Источники больших данных

Примечание: составлено авторами.

принимателей, международных организаций в разнообразной, объективной и полной статистической информации.

При этом сбор данных представляет собой процесс формирования структурированного набора данных в цифровой форме. В некоторых случаях процесс сбора данных может включать также этап оцифровки. Как правило, оцифрованные данные бывают представлены в виде:

- электронных таблиц в форматах XLS либо ODS;
- текстовых файлов в формате CSV;
- веб-страниц в формате HTML;
- файлов в формате XML;
- базы данных с доступом по технологии JSON либо через специализированный интерфейс (API).

Для обработки, проведения факторного анализа и решения других задач могут быть использованы различные среды и программы: от программного обеспечения Microsoft Excel до языков программирования, например таких, как R или Python. Каждый из них обладает своими преимуществами. По результатам опроса Python-разработчиков в сотрудничестве с Python Software Foundation, в котором приняли участие более 28 000 человек из поч-

ти 200 стран/регионов, для 84% участников опроса Python – основной язык программирования на 2021 г. и 52% опрошенных используют его для анализа данных [9]. Такая тенденция сохраняется.

3. Экспертный опрос как способ нахождения значимых факторов

Для того чтобы определиться с набором факторов, а также выявить существенные, при построении эффективной информационной системы следует изучить мнение специалистов в данной области путем проведения экспертного опроса. Респондентами выступят ученые, преподаватели.

Согласно разработанному алгоритму, в исследовании было выделено 12 факторов, ограничивающих деятельность (первый модуль алгоритма), 9 показателей, характеризующих работу организаций в сфере услуг (второй модуль) [10, 11]. В результате экспертного опроса получены 67 факторов, влияющих на эффективность деятельности. Респонденты ранжировали ответы от 0 до 5, в восьми вопросах выбирали один из вариантов и в 12 вопросах предлагали развернутый ответ.

Основным критерием для оценки эффективности является отношение эффекта к затратам на его получение. Однако для выде-

ления факторов были обобщены подходы к оценке эффективности с учетом специфики сферы услуг. Таким образом, в экспертном опросе сложилось пять групп факторов (табл. 2).

Жизнедеятельность любой организации связана с теорией жизненного цикла [12], согласно которой она проходит несколько последовательных этапов от создания до ликвидации. При этом этап создания формирует ее будущий потенциал, и от управленческих решений на этом этапе будет зависеть эффективность деятельности в будущем. В этой группе факторов предлагается оценить факторы этапа создания организации, которые затем будут оказывать влияние на ее эффективность.

Другим существенным моментом является выделение факторов, ограничивающих развитие организаций потребительского сектора. Федеральная служба государственной статистики обобщает оценку таких факторов по основным видам экономической деятельности [8]. Поэтому предлагается оценить факторы, выделенные для потребительского сектора в части организаций сферы услуг.

Деятельность организаций сферы услуг может оцениваться множеством показателей [10, 11, 13]. Для выделения существенных они были обобщены и предложены экспертам для оценки.

Оценка устойчивости организации и эффективности ее деятельности может быть основана, согласно закону сохранения [14], на сопоставлении созидательных и разрушительных ресурсов компании, как внешних, так

и внутренних, то есть потенциала созидания и разрушения. Поэтому экспертам предложено оценить факторы, влияющие на сохранение организации потребительского сектора.

Эффективность деятельности организации зависит от множества учитываемых факторов внешней среды [12, 15] и внутренних (управляемых) условий [15]. Важным моментом является то, насколько быстро она отреагирует на изменение внешних условий. Эти факторы определены с учетом специфики деятельности организаций сферы услуг [10].

В целом сформированная группировка факторов позволила выделить большой блок побуждающих сил в стремлении к эффективности деятельности современной организации сферы услуг, провести анкетирование и выделить значимые факторы.

Для проверки полученных результатов опроса на согласованность использовался коэффициент альфа Кронбаха.

$$\alpha = \frac{n}{n-1} \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n s_i^2}{s_{sum}^2} \right], \quad (1)$$

где n – объем выборки;

s_i^2 – выборочная дисперсия для i -го вопроса;

s_{sum}^2 – выборочная дисперсия суммарной шкалы.

Если значение, полученное по формуле (1), близко к 1, то шкала считается надежной. При этом для отечественных норм надежными могут быть значения альфа Кронбаха более 0,7.

Таблица 2

Группировка подходов к выделению факторов, влияющих на эффективность деятельности организации

Группы	Краткая характеристика
I	Факторы, влияющие на эффективность деятельности организаций потребительского сектора на этапе ее создания
II	Факторы, ограничивающие развитие организаций потребительского сектора в целом и сферы услуг
III	Показатели, позволяющие оценить эффективность деятельности организации потребительского сектора
IV	Факторы, влияющие на сохранение организации потребительского сектора
V	Внешние и внутренние факторы, влияющие на эффективность деятельности организации

Примечание: составлено авторами.

В результате исследования получаем (0.9497788406327947, array([0.929, 0.967])), то есть альфа Кронбаха оказывается равной 0,95. Доверительный интервал по умолчанию при факторном анализе составляет 95 % для альфа Кронбаха: [0.929, 0.967].

Можно указать другой уровень достоверности, при выборе 0,99 получаем:

(0.9497788406327947, array([0.921, 0.971])).

Значение альфа Кронбаха остается прежним, но доверительный интервал немного шире, поскольку мы использовали более высокий уровень достоверности.

Используем критерий Бартлетта (2), который проверяет гипотезу H_0 о том, что дисперсии всех k выборок одинаковы.

$$H_0 \div \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_k^2 \quad (2)$$

Проведем тест Бартлетта и получим: (15693.40507726119, 0.0). В тесте Бартлетта p -значение равно 0. Тест статистически значим, это указывает на то, что наблюдаемая корреляционная матрица не является тождественной.

Проведем факторный анализ, позволяющий выявить значимые факторы в результате экспертного опроса. В основу обработки заложен критерий Кайзера, позволяющий выделить существенные значения. Так, согласно критерию Кайзера, к числу существенных можно отнести те, чьи собственные значения выше единицы.

Получаем в результате исследования:

array([1.62832630e+01, 6.90774457e+00,
5.08670975e+00, 4.84790616e+00,
3.66298526e+00, 3.09492864e+00,
2.53852460e+00, 2.45207563e+00,
2.17522625e+00, 1.71255696e+00,
1.56757177e+00, 1.30506540e+00,
1.25470278e+00, 1.20724647e+00,
1.06927715e+00, 1.04307789e+00,
8.84850325e-01, 8.32658689e-01,
7.40515964e-01, 6.68297900e-01,
6.29140870e-01, 6.20532905e-01,
5.68702424e-01, 5.64709352e-01,
4.83580754e-01, 4.68408135e-01,
4.41603506e-01, 4.09489377e-01,

3.89146981e-01, 3.53160897e-01,
2.95491754e-01, 2.80982661e-01,
2.45897883e-01, 2.27179089e-01,
1.99675005e-01, 1.78109209e-01,
1.68846044e-01, 1.56937393e-01,
1.50642851e-01, 1.22040086e-01,
1.17236745e-01, 1.08905186e-01,
9.92324128e-02, 8.26286887e-02,
6.49028695e-02, 4.83439756e-02,
4.38847474e-02, 4.04463691e-02,
2.81380719e-02, 2.05720564e-02,
1.80021924e-02, 1.42348233e-02,
1.16922602e-02, 8.14718999e-03,
4.17008710e-03, 9.77548065e-16,
5.45608736e-16, 4.24918319e-16,
3.60530216e-16, 2.17743293e-16,
1.76795893e-16, -2.21845283e-16,
-2.42111724e-16, -4.40658648e-16,
-5.01901224e-16, -6.41061855e-16,
-9.63490428e-16])

Как видно, значимыми являются 16 факторов из 67, полученных в результате обработки данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение факторов, влияющих на тот или иной аспект деятельности, с помощью нескольких методов/подходов позволяет исключить недостатки каждого, применяемого отдельно. Получив три выборки определяющих факторов и сопоставив их, появляется возможность рассчитать интегральные параметры и разработать эффективную информационную систему. Применение этой системы позволит повысить эффективность деятельности организации сферы услуг.

Исследованы факторы, влияющие на эффективность деятельности организации сферы услуг. Проведен факторный анализ данных Федеральной службы государственной статистики и результатов экспертного опроса, что позволило спроектировать алгоритм.

Результат для выявления значимых факторов может быть представлен следующим образом (рис. 4).

Разработанный алгоритм позволяет выделять значимые факторы, влияющие на эффективность деятельности предприятия сферы



Рис. 4. Процесс и результат выявления значимых факторов

Примечание: составлено авторами.

услуг, и, как следствие, спроектировать требования к информационной системе и саму информационную систему, позволяющую достигать высоких показателей эффективности. При дальнейшем исследовании данной проблематики целесообразным будет рассмо-

треть вопросы сбора данных, интеграции информационной системы с другими платформами, позволяя быть ей более адаптивной, а также развитие более простых и удобных сервисов, например выбор местоположения будущего бизнеса.

Список источников

1. Куклев С. Е. О многообразии взглядов на категорию «бизнес-процесс» // Современные тенденции в экономике и управлении: новый взгляд. 2011. № 8. С. 42–47.
2. Подготовка данных в Data Science-проекте: рецепты для молодых хозяек. URL: <https://habr.com/ru/articles/470650/> (дата обращения: 04.07.2023).
3. Самые востребованные IT-профессии 2024 года. URL: <https://blog.skillfactory.ru/vostrebovannye-it-professii-v-2022-godu/> (дата обращения: 04.06.2023).
4. HeadHunter : официальный сайт. URL: <https://hh.ru/> (дата обращения: 04.06.2023).
5. Как Big Data меняет нашу жизнь прямо сейчас и почему за этим рынком стоит следить. URL: https://rubda.ru/market_news/kak-big-data-menyaet-nashu-zhizn-priamo-sejchas-i-pochemu-za-etim-rynkom-stoit-sledit/ (дата обращения: 04.06.2023).
6. World Bank open data. URL: <http://data.worldbank.org> (дата обращения: 09.09.2023).
7. Data.gov.ru: открытые данные России. URL: <http://data.gov.ru> (дата обращения: 09.09.2023).
8. Федеральная служба государственной статистики : официальный сайт. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 09.09.2023).
9. Python Developers Survey 2021 Results. URL: <https://lp.jetbrains.com/python-developers-survey-2021/> (дата обращения: 04.07.2023).
10. Тутуева А. А., Сизова О. В. Повышение эффективности бизнес-процессов предприятия бытового обслуживания // Проблемы экономики, финансов и управления производством : сб. науч. трудов вузов России. 2021. № 48. С. 173–180.
11. Платные услуги населению / Федеральная служба государственной статистики : официальный сайт. URL: <https://rosstat.gov.ru/uslugi> (дата обращения: 18.05.2023).

References

1. Kuklev S. E. O mnogoobrazii vzgliadov na kategoriiu “biznes-protsess”. *Sovremennye tendentsii v ekonomike i upravlenii: novyi vzgliad*. 2011;(8):42–47. (In Russian).
2. Podgotovka dannykh v Data Science-proekte: retsepty dlia molodykh khoziaek. URL: <https://habr.com/ru/articles/470650/> (accessed: 04.07.2023). (In Russian).
3. Samye vostrebovannye IT-professii 2024 goda. URL: <https://blog.skillfactory.ru/vostrebovannye-it-professii-v-2022-godu/> (accessed: 04.06.2023). (In Russian).
4. HeadHunter. URL: <https://hh.ru/> (accessed: 04.06.2023). (In Russian).
5. Kak Big Data meniaet nashu zhizn priamo seichas i pochemu za etim rynkom stoit sledit. URL: https://rubda.ru/market_news/kak-big-data-menyaet-nashu-zhizn-priamo-sejchas-i-pochemu-za-etim-rynkom-stoit-sledit/ (accessed: 04.06.2023). (In Russian).
6. World Bank open data. URL: <http://data.worldbank.org> (accessed: 09.09.2023).
7. Data.gov.ru: otkrytye dannye Rossii. URL: <http://data.gov.ru> (accessed: 09.09.2023). (In Russian).
8. Federal State Statistics Service. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (accessed: 09.09.2023). (In Russian).
9. Python Developers Survey 2021 Results. URL: <https://lp.jetbrains.com/python-developers-survey-2021/> (accessed: 04.07.2023).
10. Tutueva A. A., Sizova O. V. Increasing efficiency business processes of the household service enterprise. In: *Collection of Russian Schools Articles “Problemy ekonomiki, finansov i upravleniia proizvodstvom”*. 2021. No. 48. p. 173–180. (In Russian).
11. *Federal State Statistics Service*. Paid services for the population. URL: <https://rosstat.gov.ru/uslugi> (accessed: 18.05.2023). (In Russian).
12. Gorbunova I. A. The order of creation of enterprise structures. *Nauka bez granits*. 2017;(9):16–18. (In Russian).

12. Горбунова И. А. Порядок создания предпринимательских структур // Наука без границ. 2017. № 9. С. 16–18.
13. Мельникова А. И., Винокурова М. В. Развитие малого предпринимательства в сфере услуг в Иркутской области // Развитие малого предпринимательства в Байкальском регионе : материалы 5-й междунар. науч.-практич. конф., 22 ноября 2022 г., г. Иркутск. Иркутск : Байкальский государственный университет, 2023. С. 294–299.
14. Ильясова М. К., Сохтаев М. К. Законы организации и их взаимодействие в современных условиях // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2021. № 2. С. 97–101. DOI 10.34771/UZCEPU.2021.72.2.018.
15. Астахов Ю. В., Полякова Р. И. Внешние и внутренние факторы развития организации // Содействие профессиональному становлению личности и трудоустройству молодых специалистов в современных условиях : сб. материалов XIII Междунар. науч.-практич. конф., 19 ноября 2021 г., г. Белгород. Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2021. Ч. 1. С. 86–90.
13. Melnikova A. I., Vinokurova M. V. Development of small business in the service sector in the Irkutsk Region. In: *Proceedings of the 5th International Research-to-Practice Conference "Razvitie malogo predprinimatelstva v Baikalskom regione"*, November 22, 2022, Irkutsk. Irkutsk: Baikal State University; 2023. p. 294–299. (In Russian).
14. Ilyasova M. K., Sokhtaev M. K. Laws of organization and their interaction in modern conditions. *Scientific Notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University*. 2021;(2):97–101. DOI 10.34771/UZCEPU.2021.72.2.018. (In Russian).
15. Astakhov Yu. V., Polyakova R. I. Vneshnie i vnutrennie faktory razvitiia organizatsii. In: *Proceedings of the 13th International Research-to-Practice Conference "Sodeistvie professionalnomu stanovleniiu lichnosti i trudoustroistvu molodykh spetsialistov v sovremennykh usloviakh"*, November 19, 2021, Belgorod. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov; 2021. Pt. 1. p. 86–90. (In Russian).

Информация об авторах

А. В. Курамшина – кандидат экономических наук, доцент.

С. А. Лысенкова – кандидат физико-математических наук, доцент.

Information about the authors

A. V. Kuramshina – Candidate of Sciences (Economics), Docent.

S. A. Lysenkova – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

Научная статья

УДК 004.4: 65.012.4

DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-6

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА ДЛЯ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ КОМПАНИИ

Анна Константиновна Мальшева¹✉, Афсана Магомедовна Абдуллаева²

^{1, 2}Южный университет (ИУБуП), Ростов-на-Дону, Россия

¹malanna77@mail.ru✉, <https://orcid.org/0009-0000-1015-5477>

²alekberovaam@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-3210-0389>

Аннотация. Важной составляющей экономической стабильности организации является совершенствование управления, в том числе использование программного обеспечения для календарного планирования стратегии развития проектной компании. Современные менеджеры часто используют визуализацию в виде диаграмм задач при работе над своими проектами. Диаграмма Ганта представляет собой один из наиболее эффективных типов диаграмм. Программные продукты для создания диаграмм Ганта стали важными инструментами и лидерами в техническом арсенале многих проектных компаний. В статье представлены результаты исследования, выполненного с применением системы поддержки принятия решений (СППР) «Выбор». Отражение сути математического метода анализа иерархии, разработанного Томасом Саати, заключается в выборе наиболее предпочтительных альтернатив при принятии решений. С помощью аналитической системы искусственного интеллекта были проранжированы альтернативы в виде программного продукта (ПП) для построения диаграмм Ганта и сделан вывод о лучшем программном решении.

Ключевые слова: календарное планирование, диаграмма Ганта, программный продукт, СППР «Выбор», метод анализа иерархий, альтернативы

Для цитирования: Мальшева А. К., Абдуллаева А. М. Выбор оптимального программного продукта для календарного планирования стратегии развития компании // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 1. С. 47–53. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-6.

Original article

SELECTING AN EFFECTIVE SOFTWARE PRODUCT FOR SCHEDULING A STRATEGIC PROFILE OF A COMPANY

Anna K. Malysheva¹✉, Afsana M. Abdullaeva²

^{1, 2}Southern University (IMBL), Rostov-on-Don, Russia

¹malanna77@mail.ru✉, <https://orcid.org/0009-0000-1015-5477>

²alekberovaam@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-3210-0389>

Abstract. Management as well as the use of software for scheduling the project company's strategy are vital components of an organization's economic sustainability. When working on a project, modern managers frequently employ visual aids such as task diagrams. The Gantt chart is a highly effective type of diagrams. Many project companies now include software products for designing Gantt charts as a key tool in their technical scope. The article presents the results of a study using the Choice («Vybor») decision support system. Thomas Saaty's mathematical method of analytic hierarchy process implies the selection of the most favorable choice in decision-making. Using the analytic artificial intelligence system, the choices were ranged in a form of software products for building Gaant charts, and the most effective software decision was selected.

Keywords: scheduling, Gantt chart, software product, Choice («Vybor») DSS, analytic hierarchy process, choices

For citation: Malysheva A. K., Abdullaeva A. M. Selecting an effective software product for scheduling a strategic profile of a company. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(1):47–53. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-6.

ВВЕДЕНИЕ

Стратегическое планирование в общем виде представляет собой процесс, во время которого руководитель определяет видение, цели и задачи на какое-то время вперед [1, 2]. Отметим преимущества стратегического планирования деятельности компании.

1. Способности помочь компании улучшить координацию действий. Можно составить ясную и структурированную карту деятельности предприятия на будущее, определяя задачи и ресурсы, необходимые для его достижения. Это позволяет всем сотрудникам компании понять свои роли и обязанности, а также работать в согласованной манере.

2. Стратегическое планирование компании является мощным инструментом для формирования информационной базы. Оно требует тщательного анализа внутренних и внешних факторов, а также выявления потенциалов и ограничений. В результате компания получает обширную информацию о своих ресурсах, конкурентных преимуществах, рыночных возможностях и препятствиях. Эта информация в дальнейшем служит основой для принятия обоснованных решений и разработки стратегии развития компании.

3. Стратегическое планирование развития компании позволяет эффективно управлять своими ресурсами. Оно помогает определить необходимые средства, их приоритеты и распределение между различными проектами и задачами. Это позволяет компании максимально эффективно использовать свои ресурсы и избежать их расточительного использования.

В результате из хаоса прописывается определенный план. Целью планирования любой компании является оптимальное распределение ресурсов и достижение бизнес-цели. Стратегическое планирование представляет собой способность видеть, в каком направлении движется компания, и четко понимать задачи, стоящие перед подразделениями и отдельными сотрудниками.

Таким образом, эффективность реализации любого проекта зависит от того, как руководитель может планировать, отслеживать и контролировать ход реализации работ по нему, при этом программные продукты, используемые для системы управления проектами, могут стать одним из результативных инструментов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Можно получить значительный эффект от использования хорошо зарекомендовавших себя современных методик и инструментов, снижающих временные затраты на планирование, и соответствующие программные продукты в управлении ресурсами проекта.

В области управления проектами накопилось множество инструментов, помогающих сделать рабочий процесс более прозрачным и согласованным на всех этапах проекта.

Одним из таких инструментов для достижения целей поддержки управления работами является диаграмма Ганта, которая визуализирует идею отображения хода работ посредством горизонтальной столбчатой диаграммы. Изначально этот инструмент был предложен польским инженером Каролом Адамецким в 1896 г. под названием «гармонограмма». Поскольку в те годы Польша была частью России, а Адамецкий писал, соответственно, на польском и русском, то идея не стала широко известной на Западе. Спустя 14 лет американский инженер Генри Л. Гант самостоятельно пришел к той же идее во время работы по строительству кораблей во время Первой мировой войны. Он предложил использовать горизонтальную столбчатую диаграмму для контроля выполнения задач в проекте, и хотя она по многим свойствам проигрывает сетевым графикам, она стала одним из самых популярных способов планирования работ благодаря своей визуальной простоте. Дальнейшее ее объединение

с сетевыми графиками только повысило ее значимость. Данная диаграмма применяется для планирования и управления проектами в компаниях всех масштабов: от стартапов до крупных корпораций.

Диаграмма Ганта предполагает методологию планирования проектов в соответствии с четырьмя принципами Agile, отдающей предпочтение человекоцентризму, реальной функциональности, гибкости и адаптивности. Вместо создания полного сетевого графика работ происходит разбиение проектов на мелкие итерации, известные как спринты. В начале каждого спринта команда планирует свою работу на ближайший период, например на две-три недели, чтобы достичь целей проекта. После завершения спринта происходит анализ результатов и достижений, что помогает составить план для следующего спринта. Такой вариант декомпозиции общей задачи требует тщательного контроля за согласованием времени начала и конца отдельных операций процесса, но в целом успешно применяется во многих практических случаях.

Цель настоящего исследования – определить программное решение для построения диаграмм Ганта, необходимых при планировании производственных процессов в компании. Выберем из доступных программных продуктов (альтернатив) для построения диаграмм Ганта оптимальный:

1. GanttPRO
2. Monday.com
3. Wrike
4. Яндекс Трекер
5. Todoist

Для сравнения вышеуказанных программных продуктов воспользуемся математически обоснованным методом анализа иерархий (МАИ) Томаса Саати, реализованным при помощи программного комплекса «Система поддержки принятия решений “Выбор”». Этот метод [3] не предписывает лицу, принимающему решение, какого-либо «правильного» решения, а позволяет ему в интерактивном режиме найти такой вариант

(альтернативу), который наилучшим образом согласуется с его пониманием сути проблемы и требованиями к ее решению.

Считается [4, 5], что очевидными достоинствами МАИ являются:

- наглядность и интерпретируемость;
- выбор методов оценки и сравнения альтернатив по неизмеримым, субъективным критериям;
- устойчивость МАИ к небольшим нарушениям согласованности суждений лица, принимающего решение.

На первом этапе представим нашу задачу в виде иерархической структуры, состоящей из трех уровней (рис. 1):

- цель (выбор программного продукта);
- критерии оценки (функциональность, точность прогнозирования, интеграция с другими системами, интерфейс пользователя, масштабируемость и гибкость, безопасность, поддержка и обслуживание, цена и стоимость владения);
- объекты исследования, альтернативы (программные продукты).

Для проведения сравнительных суждений используем шкалу абсолютных значений для оценки силы суждений (таблица).

Проведем парные сравнения критериев между собой.

После того как все иерархии правильно построены и все связи установлены, необходимо произвести вычисления по методу Т. Саати. В системе поддержки принятия решений (СППР) «Выбор» все расчеты производятся автоматически, как и получение значения среднего геометрического оценок, приведение оценок к нормированному показателю и оценка согласованности суждений [5].

Получаем в итоге матрицы парных сравнений.

1. Строится матрица, размерность которой равна количеству критериев, в данном случае 8×8 (по числу критериев) (рис. 2).

2. Строятся матрицы, размерность которых равна количеству альтернатив, в данном случае 5×5 (парные сравнения альтернатив по критериям) (рис. 2).

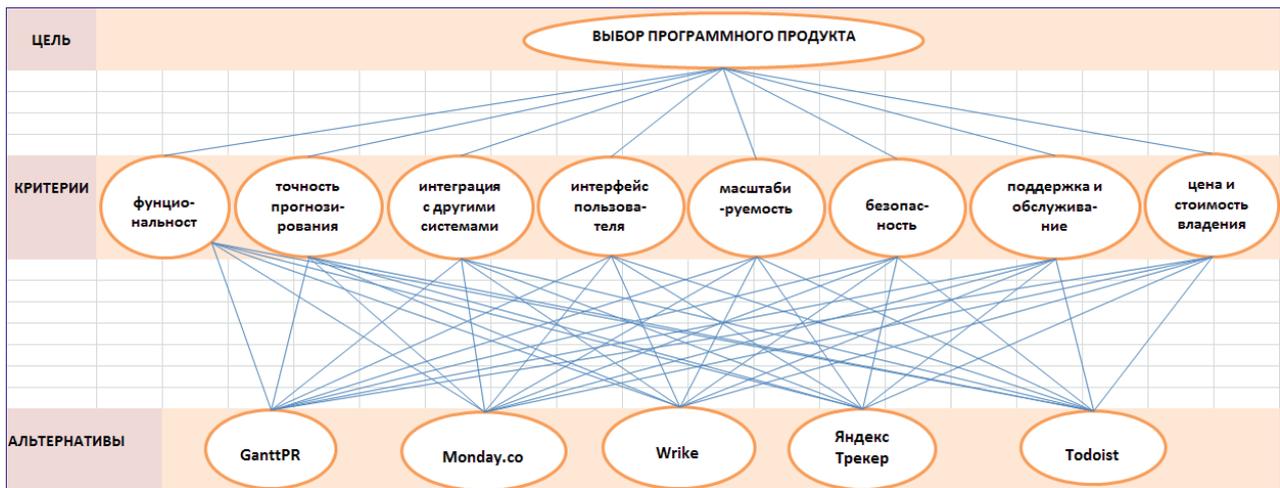


Рис. 1. Иерархическое представление задачи выбора
 Примечание: составлено авторами.

Таблица

Фундаментальная шкала

Коэффициент относительной важности	Определение
1	Равная важность
3	Умеренное превосходство одного над другим
5	Существенное или сильное превосходство
7	Значительное превосходство
9	Очень сильное превосходство
2, 4, 6, 8	Промежуточные решения между двумя соседними суждениями

Примечание: составлено по [3].

Матрица парных сравнений:

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,000	3,165	1,961	3,448	4,785	5,882	5,556	3,333
2	0,316	1,000	0,000	6,667	5,556	5,000	6,250	3,470
3	0,510	0,000	1,000	3,570	3,330	3,190	3,370	1,450
4	0,290	0,150	0,280	1,000	3,340	3,300	2,290	0,806
5	0,209	0,180	0,300	0,299	1,000	1,786	3,333	0,493
6	0,170	0,200	0,313	0,303	0,560	1,000	2,000	0,650
7	0,180	0,160	0,297	0,437	0,300	0,500	1,000	0,360
8	0,300	0,288	0,690	1,240	2,030	1,538	2,778	1,000

$\lambda_{\max} = 8,591$
 ИС = 0,084
 ОС = 0,060

Рис. 2. Матрица парных сравнений критериев оценивания
 Примечание: составлено по [2].

Рассчитав среднее геометрическое значение элементов строк матрицы, делаем вывод, что наиболее значимыми критериями при выборе программного продукта являются функ-

циональность и точность прогнозирования (рис. 3).

Аналогичным способом сравниваются объекты исследования [6, 7], т. е. наши аль-

										среднее геометри ческое
	1	2	3	4	5	6	7	8		
1	1	3,165	1,961	3,448	4,785	5,882	5,556	3,333	3,205737	
2	0,316	1	0,01	6,667	5,556	5	6,25	3,47	1,373868	
3	0,51	0,01	1	3,57	3,33	3,19	3,37	1,45	0,992965	
4	0,29	0,15	0,28	1	3,34	3,33	2,29	0,806	0,840913	
5	0,209	0,18	0,3	0,299	1	1,786	3,333	0,493	0,561658	
6	0,17	0,2	0,313	0,303	0,56	1	2	0,65	0,469164	
7	0,18	0,16	0,297	0,437	0,3	0,5	1	0,36	0,345245	
8	0,3	0,288	0,69	1,24	2,03	1,538	2,778	1	0,945956	
сумма	2,975	5,153	4,851	16,964	20,901	22,226	26,577	11,562		

Рис. 3. Иерархическое представление задачи выбора

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

тернативы (программные продукты), по критериям, – это восемь матриц (т.к. восемь критериев) попарных сравнений для пяти альтернатив (рис. 4).

При этом необходимо следить, чтобы значения не являлись противоречивыми. Та-

кие показатели, как индекс согласованности матрицы (ИС) и отношения согласованности (ОС), не должны быть больше 0,1. Если ИС > 0,1 или ОС > 0,1, то это означает, что в своих сравнениях эксперт противоречит сам себе [8].

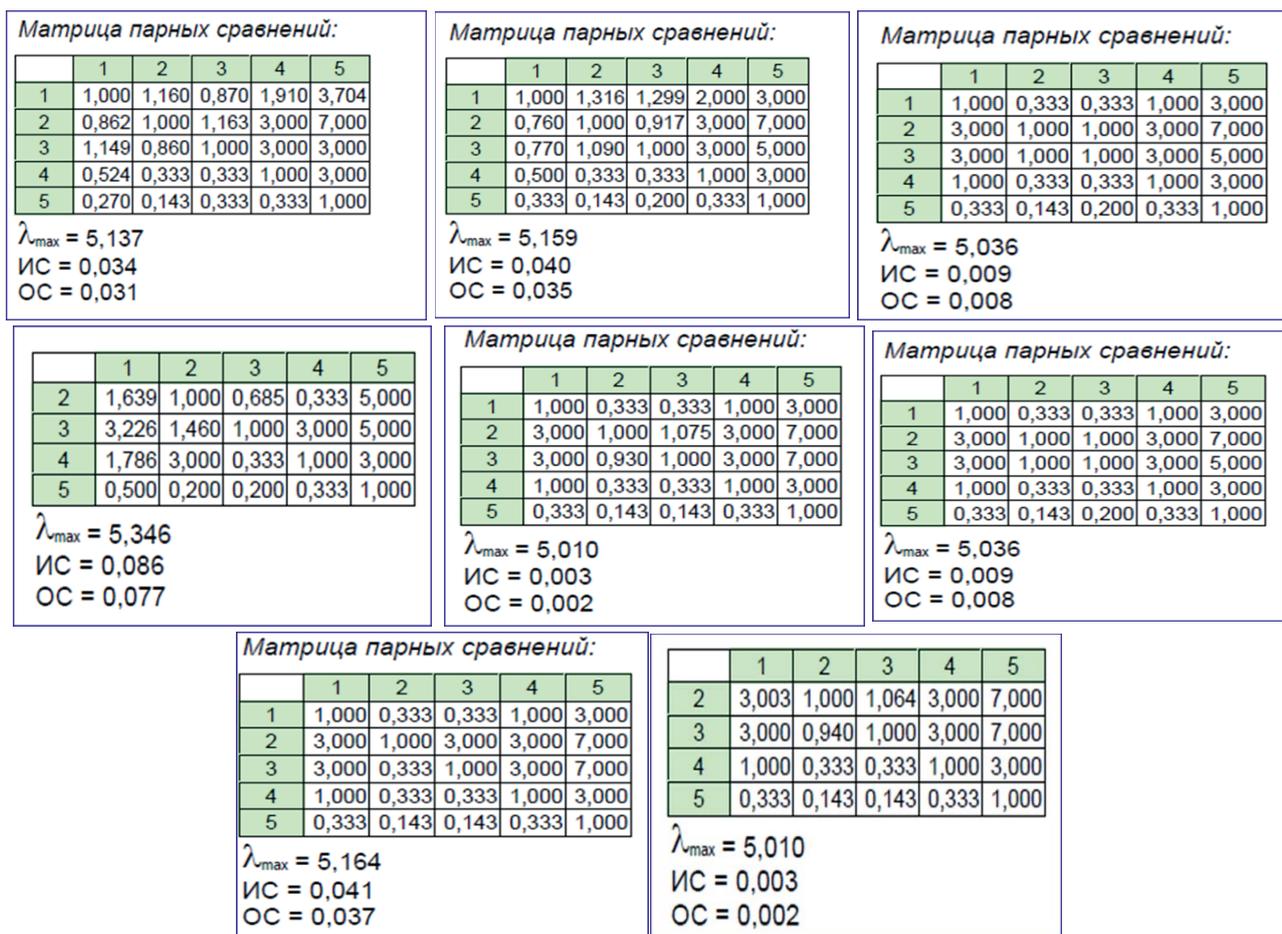


Рис. 4. Матрицы парных сравнений объектов по критериям

Примечание: составлено по [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Итогом вычислений станет наиболее предпочтительная альтернатива с учетом всех введенных критериев (рис. 3).

Из анализа рис. 5 можно сделать вывод, что альтернатива в виде программного обеспечения GanttPro наиболее предпочтительна для календарного планирования стратегии компании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно отметить, что цель работы – выбор оптимального программного продукта для календарного планирования стратегии развития компании – была достигнута. Система «Выбор» – понятная программа, которую можно рекомендовать для научных исследований.

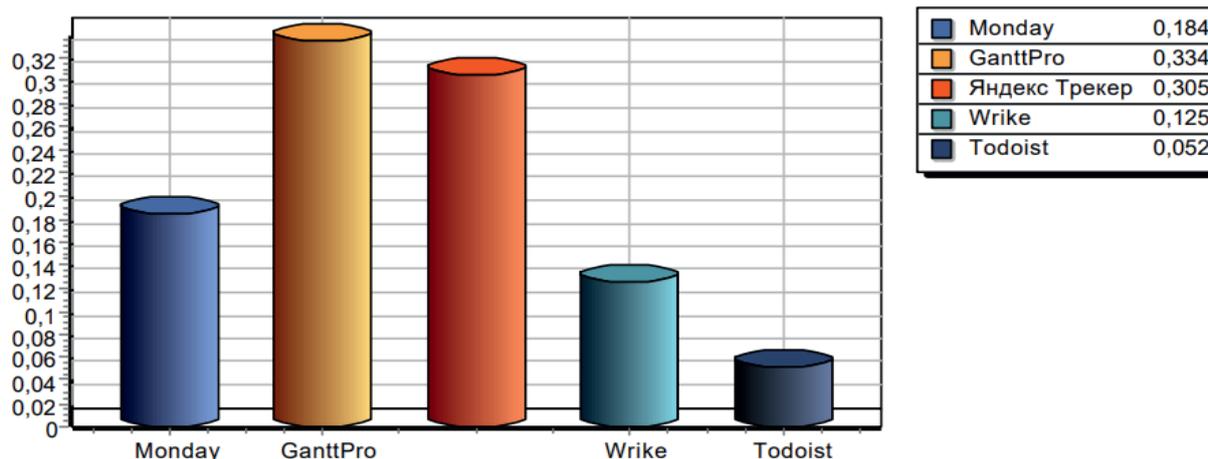


Рис. 5. Результат вычислений

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Список источников

- 13 лучших программ для построения диаграмм Ганта из 2023 года (бесплатные и платные). URL: <https://marketsplash.com/ru/proghrammnoie-obiespiechieniie-dlia-postroieniia-diaghramm-ganta/> (дата обращения: 06.02.2024).
- СППР Выбор. URL: www.ciritas.ru/product.php?id=10 (дата обращения: 16.02.2024).
- Саати Т. Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 360 с.
- Akperov I. G., Khramov V. V. Development of instruments of fuzzy identification of extended objects based on the results of satellite monitoring. In: Aliev R., Kacprzyk J., Pedrycz W., Jamshidi M., Sadikoglu F., editors. *13th International Conference on Theory and Application of Fuzzy Systems and Soft Computing – ICAFS-2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 896. Cham: Springer; 2019. p. 325–332.
- Akperov G. I., Khramov V. V., Gorbacheva A. A. Using soft computing methods for the functional benchmarking of an intelligent workplace in an educational establishment. In: Aliev R., Kacprzyk J., Pedrycz W., Jamshidi M., Babanli M., Sadikoglu F., editors. *10th International Conference on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words and Perceptions –*

References

- 13 luchshikh programm dlia postroeniia diagramm Ganta iz 2023 goda (besplatnye i platnye). URL: <https://marketsplash.com/ru/proghrammnoie-obiespiechieniie-dlia-postroieniia-diaghramm-ganta/> (accessed: 06.02.2024). (In Russian).
- SPPR Vybor. URL: www.ciritas.ru/product.php?id=10 (accessed: 16.02.2024). (In Russian).
- Saaty T. L. Decision making with dependence and feedback. *The analytic network process*. Moscow: Publishing House LKI; 2008. 360 p. (In Russian).
- Akperov I. G., Khramov V. V. Development of instruments of fuzzy identification of extended objects based on the results of satellite monitoring. In: Aliev R., Kacprzyk J., Pedrycz W., Jamshidi M., Sadikoglu F., editors. *13th International Conference on Theory and Application of Fuzzy Systems and Soft Computing – ICAFS-2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 896. Cham: Springer; 2019. p. 325–332.
- Akperov G. I., Khramov V. V., Gorbacheva A. A. Using soft computing methods for the functional benchmarking of an intelligent workplace in an educational establishment. In: Aliev R., Kacprzyk J., Pedrycz W., Jamshidi M., Babanli M., Sadikoglu F., editors. *10th International Conference on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words and Perceptions –*

- ICSCCW-2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1095. Cham: Springer; 2020. p. 54–60.
6. Akperov I. G., Khramov V. V. The concept of a unified geoinformational space of the region: Ecological aspect. In: Rudoy D., Olshevskaya A., Kankhva V., editors. *E3S Web of Conferences. Innovative Technologies in Science and Education (ITSE-2020)*, August 19–30, 2020, Divnomorskoe village, Russian Federation. Vol. 210. Rostov-on-Don; 2020. p. 09006.
 7. Kramarov S., Khramov V. Methodology of formation of unite geo-informational space in the region. In: Sukhomlin V., Zubareva E., editors. *Modern Information Technology and IT Education. SITITO 2018. Communications in Computer and Information Science*. Vol. 1201. Cham: Springer; 2020. p. 309–316.
 8. Akperov I. G., Akperov G. I., Alekseichik T. V. et al. Soft models of management in terms of digital transformation. Monograph. Rostov-on-Don: PEI HE SU (IUBIP); 2019. 188 p.
- ICSCCW-2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1095. Cham: Springer; 2020. p. 54–60.
6. Akperov I. G., Khramov V. V. The concept of a unified geoinformational space of the region: Ecological aspect. In: Rudoy D., Olshevskaya A., Kankhva V., editors. *E3S Web of Conferences. Innovative Technologies in Science and Education (ITSE-2020)*, August 19–30, 2020, Divnomorskoe village, Russian Federation. Vol. 210. Rostov-on-Don; 2020. p. 09006.
 7. Kramarov S., Khramov V. Methodology of formation of unite geo-informational space in the region. In: Sukhomlin V., Zubareva E., editors. *Modern Information Technology and IT Education. SITITO 2018. Communications in Computer and Information Science*. Vol. 1201. Cham: Springer; 2020. p. 309–316.
 8. Akperov I. G., Akperov G. I., Alekseichik T. V. et al. Soft models of management in terms of digital transformation. Monograph. Rostov-on-Don: PEI HE SU (IUBIP); 2019. 188 p.

Информация об авторах

А. К. Мальшева – помощник ректора по общим вопросам, магистрант.

А. М. Абдуллаева – юрист, аспирант.

Information about the authors

A. K. Malysheva – Assistant to Rector of General Matters, Master's Degree Student.

A. M. Abdullaeva – Lawyer, Postgraduate.

Научная статья
УДК 519.237:519.854.33
DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-7

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОСТОЙ ФОРМЫ ВЛОЖЕННОЙ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ МЕТОДОМ СМЕШАННОГО ОЦЕНИВАНИЯ

Сергей Иванович Носков^{1✉}, Алексей Николаевич Знайдюк²

^{1, 2}Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

¹sergey.noskov.57@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-4097-2720>

²znaidyuk00@gmail.com

Аннотация. В работе описан алгоритмический способ определения численных оценок параметров простой формы вложенной кусочно-линейной регрессии методом смешанного оценивания. Его суть состоит в их одновременной идентификации методами наименьших модулей и антиробастного оценивания, каждый из которых «работает» на своей подвыборке данных исходной выборки. Этот способ сводится к решению задачи линейно-булевого программирования. Решен численный пример.

Ключевые слова: регрессионная модель, простая форма вложенной кусочно-линейной регрессии, методы наименьших модулей, антиробастного и смешанного оценивания, задача линейно-булевого программирования

Для цитирования: Носков С. И., Знайдюк А. Н. Вычисление параметров простой формы вложенной кусочно-линейной регрессии методом смешанного оценивания // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 1. С. 54–59. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-7.

Original article

CALCULATING PARAMETERS OF A SIMPLE NESTED PIECEWISE LINEAR REGRESSION USING MIXED ESTIMATION

Sergey I. Noskov^{1✉}, Aleksey N. Znaidyuk²

^{1, 2}Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

¹sergey.noskov.57@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-4097-2720>

²znaidyuk00@gmail.com

Abstract. The article describes an algorithm for calculating numerical estimates of the parameters of a simple nested piecewise linear regression using mixed estimation. The algorithm aims at simultaneous identification using methods of least modules and antirobust estimation, both of which operate on certain subsamplings from the initial sampling. The approach comes to solving the problem of linear Boolean programming. A numerical problem has been solved.

Keywords: regression model, simple nested piecewise linear regression, methods of the least modules, antirobust and mixed estimation, linear Boolean programming problem

For citation: Noskov S. I., Znaidyuk A. N. Calculating parameters of a simple nested piecewise linear regression using mixed estimation. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(1):54–59. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-7.

ВВЕДЕНИЕ

При построении математических моделей регрессионного типа исследователи часто эффективно используют различные нелинейные формы связи между независимыми переменными, в том числе кусочно-линейные. Так, в работе [1] рассматривается робастная модель кусочно-линейной регрессии с неизвестным количеством точек переключения. Статья [2] посвящена методу оптимизации невыпуклой кусочно-линейной модели многомерной регрессии, адаптированной для решения проблемы проектирования системы безопасности для крупного автопроизводителя США и решенной с помощью метода ветвей и границ. В [3] представлена процедура автоматической спецификации моделей, основанных на предположениях об аддитивности и кусочно-линейности. Эта процедура позволяет аналитику получить представление о проблеме при исследовании автоматически выбранной модели, что позволяет легко проверить достоверность прогноза. В работе [4] предлагается использовать нечеткую кусочную регрессионную модель как развитие традиционной логистической модели. Предлагаемый метод способен не только обнаруживать точки переключения, но и определять прогнозируемые интервалы, когда на тенденцию роста анализируемого поколения продуктов влияют другие поколения. Для демонстрации эффективности предлагаемой модели используются рыночные доли четырех телевизионных технологий. Результаты показывают, что предложенная модель превосходит логистическую модель, обеспечивая как лучшие, так и худшие возможные доли рынка для соответствующего поколения, а также определяя время воздействия внешних воздействий путем выявления точек переключения.

Целью исследования [5] является применение кусочно-линейной аппроксимации (КЛА) в качестве метода анализа тенденций, который учитывает структурные сдвиги. КЛА использует полные данные для одновременной оценки контрольных точек и постоянно связанных тенденций непосредственно до и после пере-

рыва. Таким образом, КЛА не только обеспечивает простоту интерпретации результатов, но и исключает вероятность неверных заключений за счет однозначного определения текущей тенденции, что делает расчетный результат надежным. Тематическое исследование подтверждает предположение о том, что тенденции продаж некоторых продуктов и необходимость определения подходящего временного интервала для анализа данных претерпевали изменения по крайней мере один раз. Статья [6] посвящена разработке алгоритма решения задач построения многомерной регрессии и классификации с использованием кусочно-линейных предикторов над многогранным разбиением пространства признаков. В работе [7] изучается частично линейная аддитивная регрессия с пространственными данными. Разработана новая процедура оценки неизвестных параметров и аддитивных компонентов регрессии. Предложенный метод подходит для данных большой размерности, нет необходимости решать ограниченную задачу минимизации, не требуются итерационные алгоритмы. В мягких предположениях регулярности установлено асимптотическое распределение оценки вектора неизвестных параметров, а также получены асимптотические распределения оценок неизвестных функций. В работе [8] рассмотрены методы построения цензурированной регрессии, которые обеспечивают мощный и гибкий подход к анализу данных о выживаемости, когда считаются подходящими, в частности стандартные линейные модели. Исследование [9] посвящено способам построения кусочно-экспоненциальных моделей. Широка практическая направленность применения кусочно-линейных регрессий, они, в частности, используются при прогнозировании чрезвычайных ситуаций [10], оценке состояния технического объекта [11], анализе данных испытаний скважин [12].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пусть при исследовании анализируемого объекта исследователь полагает, что на выходной фактор (зависимую переменную)

у оказывают влияние входные факторы (независимые переменные) x_1, x_2, \dots, x_m , т. е. исходит из наличия регрессионной связи:

$$y_k = F(a; x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{km}) + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n},$$

где k – номер наблюдения,

n – их количество,

F – аппроксимирующая функция,

a – вектор параметров,

ε – ошибки аппроксимации, при этом будем исходить из отсутствия какой-либо информации об их вероятностной природе, как это и принято в рамках логико-алгебраического подхода к анализу данных.

В работе [13] введены в рассмотрение так называемые вложенные кусочно-линейные аппроксимирующие функции первого и второго типов:

– вложенная кусочно-линейная регрессия первого типа:

$$y_k = \min \left\{ \min_{i \in I^1} \{a_i^1 x_{ki}\}, \dots, \min_{i \in I^G} \{a_i^G x_{ki}\}, \right. \\ \left. \max_{i \in J^1} \{\beta_i^1 x_{ki}\}, \dots, \max_{i \in J^H} \{\beta_i^H x_{ki}\} \right\} + \varepsilon_k;$$

– вложенная кусочно-линейная регрессия второго типа:

$$y_k = \max \left\{ \min_{i \in I^1} \{a_i^1 x_{ki}\}, \dots, \min_{i \in I^G} \{a_i^G x_{ki}\}, \right. \\ \left. \max_{i \in J^1} \{\beta_i^1 x_{ki}\}, \dots, \max_{i \in J^H} \{\beta_i^H x_{ki}\} \right\} + \varepsilon_k,$$

где наперед заданные индексные множества $I^i, i = \overline{1, G}, J^i, i = \overline{1, H}$ представляют собой подмножества множества $\{1, 2, \dots, m\}$ и могут иметь непустые попарные пересечения.

В [14] приводятся, в частности, некоторые возможные конкретизации вложенных кусочно-линейных регрессий, в том числе простая вложенная кусочно-линейная регрессия:

$$y_k = \min \{ \min_{i \in I} \{a_i x_{ki}\}, \max_{i \in J} \{\beta_i x_{ki}\} \} + \varepsilon_k, \quad (1)$$

Наконец, в работе [15] описан алгоритмический способ идентификации параметров модели (1) с помощью метода наименьших модулей (МНМ), состоящего в решении задачи:

$$\sum_{k=1}^n |\varepsilon_k| \rightarrow \min. \quad (2)$$

В [15] показано, что задача (2) может быть сведена к задаче линейно-булевого программирования (ЛБП). Действительно, введем следующие обозначения:

$$h_k = \min_{i \in I} \{a_i x_{ki}\}, \quad k = \overline{1, n},$$

$$g_k = \min_{i \in J} \{\beta_i x_{ki}\}, \quad k = \overline{1, n},$$

$$t_k = \min \{h_k, g_k\}, \quad k = \overline{1, n}.$$

Тогда задача оценивания параметров эквивалентна следующей задаче ЛБП:

$$h_k \leq a_i x_{ki}, \quad k = \overline{1, n}, \quad i \in I, \quad (3)$$

$$a_i x_{ki} - h_k \leq (1 - s_{ki})M, \quad k = \overline{1, n}, \quad i \in I, \quad (4)$$

$$\sum_{i \in J} s_{ki} = 1, \quad k = \overline{1, n}, \quad (5)$$

$$g_k \geq \beta_i x_{ki}, \quad k = \overline{1, n}, \quad i \in I, \quad (6)$$

$$\beta_i x_{ki} - g_k \geq (\rho_{ki} - 1)M, \quad k = \overline{1, n}, \quad i \in J, \quad (7)$$

$$\sum_{i \in J} \rho_{ki} = 1, \quad k = \overline{1, n}, \quad (8)$$

$$t_k \leq h_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (9)$$

$$t_k \leq g_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (10)$$

$$h_k - t_k + Mr_k \leq M, \quad k = \overline{1, n}, \quad (11)$$

$$g_k - t_k - Mr_k \leq 0, \quad k = \overline{1, n}, \quad (12)$$

$$t_k + u_k - v_k = y_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (13)$$

$$u_k \geq 0, \quad v_k \geq 0, \quad h_k \geq 0, \quad g_k \geq 0, \quad t_k \geq 0, \quad k = \overline{1, n}, \quad (14)$$

$$s_{ki} \in \{0, 1\} \quad k = \overline{1, n}, \quad i \in I, \quad (15)$$

$$p_{ki} \in \{0, 1\} \quad k = \overline{1, n}, \quad i \in I, \quad (16)$$

$$r_{ki} \in \{0, 1\} \quad k = \overline{1, n}, \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^n (u_k + v_k) \rightarrow \min. \quad (18)$$

Заметим, что для недопустимости получения бессмысленного результата (крайне редкого в реальных ситуациях) полезно несколько скорректировать целевую функцию задачи ЛБП (3)–(18) следующим образом:

$$\sum_{k=1}^n (u_k + v_k) + \delta (\sum_{i \in I} \alpha_i - \sum_{i \in J} \beta_i) \rightarrow \min, \quad (19)$$

где δ – наперед заданная малая положительная константа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поставим теперь задачу определения параметров модели (2) с помощью метода смешанного оценивания (МСО) [16]. Его суть состоит в следующем; пусть, исходя из некоторых эмпирических или теоретических принципов, множество номеров всех наблюдений $P = \{1, 2, \dots, n\}$ в простейшем случае может быть раз-

бито на два непересекающихся подмножества $P_1 \subset P$ и $P_2 \subset P$:

$$P_1 \cup P_2 = P, P_1 \cap P_2 = \emptyset.$$

При этом минимизация ошибок аппроксимации на первом из них производится в соответствии с МНМ:

$$L^1(\alpha) = \sum_{k \in P_1} |\varepsilon_k| \rightarrow \min,$$

а на втором – с методом антиробастного оценивания:

$$L^2(\alpha) = \max_{k \in P_2} |\varepsilon_k| \rightarrow \min.$$

В совмещении этих двух задач, т. е. в одновременной минимизации функций $L^1(\alpha)$ и $L^2(\alpha)$, и состоит идея метода смешанного оценивания.

Для реализации МСО при вычислении параметров простой вложенной кусочно-линейной регрессии (1) введем в систему ограничений задачи ЛБП (3)–(17), (19) новые неравенства:

$$u_k + v_k \leq b, k \in P_2, \quad (20)$$

и заменим целевую функцию (19) на следующую:

$$\sum_{k \in P_1} (u_k + v_k) / s + b + \eta \sum_{k \in P_2} (u_k + v_k) + \delta (\sum_{i \in I} \alpha_i - \sum_{i \in J} \beta_i) \rightarrow \min, \quad (21)$$

где s – число элементов в множестве, – заранее заданное малое положительное число.

Поставим задачу построения простой вложенной кусочно-линейной регрессии (1) с помощью МСО на основе данных из работы [15]:

$$X = \begin{pmatrix} 2 & 4 & 3 \\ 7 & 1 & 9 \\ 6 & 5 & 8 \\ 3 & 8 & 4 \end{pmatrix}, \quad y = \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \\ 2 \\ 9 \end{pmatrix}.$$

Сформируем множества I , J , P_1 и P_2 следующим образом:

$$\begin{aligned} I &= \{1, 2\}, \\ J &= \{2, 3\}, \\ P_1 &= \{2, 3\}, \end{aligned}$$

$$P_2 = \{1, 4\}.$$

Результат решения этой задачи на основе применения МНМ состоит в следующем [15]:

$$\begin{aligned} y_k &= \min \{ \min \{ 2x_{k1}, 4x_{k2} \}, \\ &\max \{ 0.75x_{k2}, 0.468x_{k3} \} \} + \varepsilon_k, k = \overline{1, 4}, \quad (22) \\ h &= (4, 4, 12, 6), \\ g &= (3, 4.218, 3.75, 6), \\ t &= (3, 4, 3.75, 6), \\ u &= (0, 0, 0, 3), \\ v &= (0, 0, 1.75, 0), \\ L^1 &= 1.75, \\ L^2 &= 3. \end{aligned}$$

В результате применения МСО путем решения задачи ЛБП (3)–(17), (20), (21) получим:

$$\begin{aligned} y_k &= \min \{ \min \{ 2.66x_{k1}, 4x_{k2} \}, \\ &\max \{ 1.0x_{k2}, 0.624x_{k3} \} \} + \varepsilon_k, k = \overline{1, 4}, \quad (23) \\ h &= (5.33, 4, 16, 8), \\ g &= (4, 5.62, 5, 8), \\ t &= (4, 4, 5, 8), \\ u &= (0, 0, 0, 1), \\ v &= (1, 0, 3, 0), \\ L^1 &= 3, \\ L^2 &= 1. \end{aligned}$$

Таким образом, по критерию L^1 модель (23) на 1.25 уступает модели (22), но по критерию L^2 превосходит ее на 2. При этом все оценки параметров модели (23) не меньше оценок модели (22).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продолжены исследования, связанные с разработкой различных форм вложенных кусочно-линейных регрессионных моделей. Предложен алгоритмический способ определения численных оценок параметров простой формы такой регрессии методом смешанного оценивания, сводящийся к решению задачи линейно-булевого программирования.

Список источников

1. Shi S., Li Y., Wan C. Robust continuous piecewise linear regression model with multiple change points. *J Supercomput.* 2020;76:3623–3645.
2. Martinez N., Anahideh H., Rosenberger J. M. et al. Global optimization of non-convex piecewise linear regression splines. *J Glob Optim.* 2017;68:563–586.
3. Gascón A., Sánchez-Úbeda E. F. Automatic specification of piecewise linear additive models: Application to forecasting natural gas demand. *Stat Comput.* 2017;28:201–217.
4. Yu J. R., Tseng F.-M. Fuzzy piecewise logistic growth model for innovation diffusion: A case study of the TV Industry. *Int J Fuzzy Syst.* 2015;18:511–522.
5. Moriyama T., Kuwano M., Nakayama M. A statistical method for estimating piecewise linear sales trends. *J Market Anal.* 2023. URL: <https://link.springer.com/article/10.1057/s41270-023-00207-9> (дата обращения: 04.01.2024).
6. Bemporad A. A piecewise linear regression and classification algorithm with application to learning and model predictive control of hybrid systems. *IEEE Transactions on Automatic Control.* 2023;68:3194–3209.
7. Qingguo T., Wenyu C. Estimation for partially linear additive regression with spatial data. *Stat Papers.* 2022;63:2041–2063.
8. Neocleous T., Portnoy S. Partially linear censored quantile regression. *Lifetime Data Anal.* 2009;15:357–378.
9. Demarqui F. N., Loschi R. H., Colosimo E. A. Estimating the grid of time-points for the piecewise exponential model. *Lifetime Data Anal.* 2008;14:333–356.
10. Жижин К. С., Благородова Н. В. Использование кусочно-линейной регрессии в прогнозировании чрезвычайных ситуаций // Международный журнал экспериментального образования. 2016. № 5–3. С. 337–338.
11. Клячкин В. Н., Бубыр Д. С. Прогнозирование состояния технического объекта на основе кусочно-линейных регрессий // Радиотехника. 2014. № 7. С. 137–140.
12. Изюмов Б. Д. Кусочно-линейный нечеткий регрессионный анализ данных испытаний скважин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2013. № 11. С. 22–29.
13. Носков С. И. Подход к формализации вложенной кусочно-линейной регрессии // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2023. № 1–2. С. 218–220.
14. Носков С. И. Некоторые формы вложенной кусочно-линейной регрессии // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 3. С. 467–469.
15. Носков С. И. Идентификация параметров простой формы вложенной кусочно-линейной регрессии // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре го-

References

1. Shi S., Li Y., Wan C. Robust continuous piecewise linear regression model with multiple change points. *J Supercomput.* 2020;76:3623–3645.
2. Martinez N., Anahideh H., Rosenberger J. M. et al. Global optimization of non-convex piecewise linear regression splines. *J Glob Optim.* 2017;68:563–586.
3. Gascón A., Sánchez-Úbeda E. F. Automatic specification of piecewise linear additive models: Application to forecasting natural gas demand. *Stat Comput.* 2017;28:201–217.
4. Yu J. R., Tseng F.-M. Fuzzy piecewise logistic growth model for innovation diffusion: A case study of the TV Industry. *Int J Fuzzy Syst.* 2015;18:511–522.
5. Moriyama T., Kuwano M., Nakayama M. A statistical method for estimating piecewise linear sales trends. *J Market Anal.* 2023. URL: <https://link.springer.com/article/10.1057/s41270-023-00207-9> (accessed: 04.01.2024).
6. Bemporad A. A piecewise linear regression and classification algorithm with application to learning and model predictive control of hybrid systems. *IEEE Transactions on Automatic Control.* 2023;68:3194–3209.
7. Qingguo T., Wenyu C. Estimation for partially linear additive regression with spatial data. *Stat Papers.* 2022;63:2041–2063.
8. Neocleous T., Portnoy S. Partially linear censored quantile regression. *Lifetime Data Anal.* 2009;15:357–378.
9. Demarqui F. N., Loschi R. H., Colosimo E. A. Estimating the grid of time-points for the piecewise exponential model. *Lifetime Data Anal.* 2008;14:333–356.
10. Zhizhin K. S., Blagorodova N. V. Ispolzovanie kusochno-lineinoi regressii v prognozirovanii chrezvychainykh situatsii. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimentalnogo obrazovaniia.* 2016;(5–3):337–338. (In Russian).
11. Klyachkin V. N., Buby D. S. Forecasting of technical object state based on piecewise linear regressions. *Radiotekhnika.* 2014;(7):137–140. (In Russian).
12. Izyumov B. D. Piecewise-linear fuzzy regression analysis of well testing data. *Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry.* 2013;(11):22–29. (In Russian).
13. Noskov S. I. Approach to formalizing nested piece-linear regression. *International Journal of Humanities and Natural Sciences.* 2023;(1–2):218–220. (In Russian).
14. Noskov S. I. Some forms of nested piece-linear regression. *News of the Tula State University. Technical Sciences.* 2023;(3):467–469. (In Russian).
15. Noskov S. I. Parameter identification of the simple form of a nested piecewise linear regression. *Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2023;(3):57–61. (In Russian).

- сударственного технического университета. 2023. № 3. С. 57–61.
16. Носков С. И., Перфильева К. С. Эмпирический анализ некоторых свойств метода смешанного оценивания параметров линейного регрессионного уравнения // Наука и бизнес: пути развития. 2020. № 6. С. 62–66.
16. Noskov S. I., Perfilyeva K. S. Empirical analysis of some properties of the mixed estimation method for linear regression equation parameters. *Science and Business: Ways of Development*. 2020;(6):62–66. (In Russian).

Информация об авторах

С. И. Носков – доктор технических наук, профессор.
А. Н. Знайдюк – студент.

Information about the authors

S. I. Noskov – Doctor of Sciences (Engineering), Professor.
A. N. Znaidyuk – Student.

Научная статья
УДК 531.77:622.692.4
DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-8

ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРИ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА МАГИСТРАЛЬНЫЙ ТРУБОПРОВОД

Максим Витальевич Романовский¹✉, Алексей Иванович Солдатов²

¹Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

¹noiremagnus@gmail.com✉

²asoldatof@mail.ru

Аннотация. В статье представлен способ обработки акустических сигналов при возникновении несанкционированного действия на магистральном трубопроводе на примере проведенных экспериментов по имитации незаконной врезки в виде сверления тела металлической трубы. В рамках эксперимента были записаны акустические сигналы и проведена обработка на основе метода быстрого преобразования Фурье. По результатам были идентифицированы пики характерных частот в пределах каждого эксперимента. Исследование направлено на повышение безопасности протяженных объектов особой государственной важности путем определения угрозы по характерным пикам частот получаемых при обработке акустических сигналов от противоправных действий и, как следствие, оперативного оповещения службы безопасности.

Ключевые слова: система физической защиты, магистральный трубопровод, акустический датчик, преобразование Фурье, частотный спектр сигнала

Для цитирования: Романовский М. В., Солдатов А. И. Обработка акустических сигналов при несанкционированном воздействии на магистральный трубопровод // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 1. С. 60–67. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-8.

Original article

ACOUSTIC SIGNALS PROCESSING IN UNAUTHORIZED OPERATION ON THE MAIN PIPELINE

Maksim V. Romanovsky¹✉, Aleksey I. Soldatov²

¹Surgut State University, Surgut, Russia

²Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

¹noiremagnus@gmail.com✉

²asoldatof@mail.ru

Abstract. The article demonstrates an approach for acoustic signal processing under conditions of unauthorized operation on the main pipeline. A case study included tests that simulated illegal pipeline tie-ins using metal pipe drilling. In the course of the study, acoustic signals were recorded and processed using the Fourier transform method. The findings revealed the apexes of common frequencies for each test. The study aims to advance the protection of long-distance high-priority facilities from illegal actions by detecting any threat based on the common apexes of frequencies recorded during acoustic signal processing, as well as to improve the timely reporting of security services.

Keywords: physical protection system, main pipeline, acoustic sensor, Fourier transform, signal frequency spectrum

For citation: Romanovsky M. V., Soldatov A. I. Acoustic signals processing in unauthorized operation on the main pipeline. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(1):60–67. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-8.

ВВЕДЕНИЕ

Магистральный трубопроводный транспорт относится к объектам особой стратегической государственной важности согласно [1], которые следует соответственно охранять, применяя новейшие методы физической защиты (ФЗ).

По состоянию на 2022 г., согласно Федеральной службе государственной статистики [2], протяженность магистральных трубопроводов, перекачивающих нефть и газ в России, составляет 256 тыс. километров, при этом общий объем грузооборота продуктов за тот же год в среднем составил 2 653 млрд т·км. Охрана настолько протяженных объектов является нетривиальной задачей и требует компромиссного подхода. Ввиду важности такого объекта необходимо организовать должную защиту в соответствии с общими принципами построения системы физической защиты (СФЗ): своевременность, зональность, равнопрочность, адекватность и другие общетехнические принципы. С одной стороны, необходимо организовать такую СФЗ, которая бы своевременно оповещала персонал службы безопасности, сотрудники безопасности контролировали объект и сам объект был бы равно защищен по всей протяженности, но, с другой стороны, нерационально охранять объект в сложных климатических регионах, например Арктической зоне, ввиду больших экономических затрат.

По этой причине в основном применяются технические средства (ТС) обнаружения несанкционированных действий и инженерные средства (ИС), позволяющие защитить объект, например, забором, колючей проволокой, или расположить трубопровод под землей и наделять его свойствами самозащитности.

Тем не менее это не всегда помогает. Так, по статистике, приведенной в официальном отчете ПАО «Транснефть» [3], число незаконных врезок в 2019 г. составило 219 шт. При этом наносится не только экономиче-

ский урон, который оценивается примерно в 37 млрд руб. в год, но и экологический. Так, последний инцидент, случившийся на участке Самотлор – Нижневартовск в 2022 г., устранялся 40 специалистами и 15 единицами техники [4]. При этом ответственные за данный инцидент с хищением так и не были установлены.

Метод, описанный в данной работе, позволит не только зарегистрировать событие несанкционированного действия, как это описано в патенте на изобретение [5], но и поможет определить вид угрозы после обработки считанного акустического сигнала и сопоставленного с эталонной базой звуковых сигналов. Кроме того, данный способ понизит вероятность ложного срабатывания ТС обнаружения системы безопасности.

Описанный метод основан на быстром преобразовании Фурье, позволяющем обработать полученный акустический сигнал, переведя его в частотный спектр. Применяв его в спектральной обработке, можно получить зависимость плотности сигнала от частоты и выявить характерные частотные пики для того или иного взаимодействия с охраняемым объектом, например сверление, удар и вваривание. Более подробно метод описан в [6] и [7].

Обработка вышеописанным методом в рамках эксперимента проводилась в аналитическом программном обеспечении MATLAB.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Спектральный анализ – это метод, используемый для изучения частотных компонентов сигнала. Одним из наиболее часто используемых методов спектрального анализа является быстрое преобразование Фурье (БПФ). Он основан на теореме о том, что любой периодический сигнал может быть представлен в виде суммы комплексных экспоненциальных функций. Это позволяет разложить сигнал на его частотные составляющие, которые

могут быть проанализированы для определения характеристик сигнала.

БПФ работает путем разбиения входного сигнала на перекрывающиеся сегменты и вычисления их Фурье-преобразования. Затем результаты объединяются для получения итогового спектра сигнала. Этот процесс значительно ускоряет вычисление Фурье-преобразования по сравнению с традиционным методом, который требует большого количества времени и вычислительных ресурсов [6].

Одним из основных преимуществ БПФ является его высокая точность и эффективность. Он позволяет получить более точные результаты по сравнению с другими методами спектрального анализа, такими как преобразование Фурье, за меньшее время. Кроме того, БПФ может обрабатывать большие объемы данных без потери точности, что делает его идеальным для анализа сложных сигналов.

Метод БПФ описывается следующими этапами [7].

Разбиение сигнала. На данном этапе сигнал разбивается на перекрывающиеся сегменты, каждый из которых достаточно короткий, чтобы его можно было обработать с помощью быстрого преобразования Фурье. Длина сегмента обычно выбирается кратной степени числа 2, поскольку это позволяет эффективно использовать алгоритм БПФ.

Вычисление Фурье-преобразования. Далее для каждого сегмента вычисляется его Фурье-преобразование, которое представляет собой спектр частот, присутствующих в данном сегменте.

Умножение на весовые коэффициенты. Полученные Фурье-преобразования умножаются на специальные весовые коэффициенты, которые обеспечивают точность результата и минимизируют ошибки.

Сложение преобразований. Фурье-преобразования всех сегментов складываются вместе с учетом их весовых коэффициентов. В результате получается спектр всего исходного сигнала.

Интерполяция и фильтрация. После получения спектра сигнала его можно интерполи-

ровать и фильтровать, чтобы получить более точную информацию о частотах и амплитудах различных составляющих сигнала.

Обратное преобразование. Если необходимо восстановить исходный сигнал из его спектра, то выполняется обратное преобразование Фурье полученного спектра. Далее по статье эти этапы применяются в практическом эксперименте в более подробном виде.

Для демонстрации обработки сигнала методом БПФ и применения спектральной обработки воспользуемся программным обеспечением MATLAB и записанным звуковым сигналом удара молотком по металлической трубе.

В результате записи сигнала можно получить сигнал, представленный на рис. 1. Он представляет собой короткий импульс удара с продолжительным затуханием.

После обработки с помощью быстрого преобразования Фурье можно попытаться визуализировать спектр на рис. 2.

Вид такого графика обусловлен тем, что функция `plot` строит график значений комплексной величины на комплексной плоскости, поэтому необходимо построить амплитудный спектр сигнала, воспользовавшись функцией `abs` для вычисления модуля комплексного вектора, результат представлен на рис. 3 [8].

В итоге получается действительный сигнал, при этом выход функции учитывает область положительных и отрицательных частот.

Для представления графика в более привычном виде зеркально относительно нулевой частоты необходимо воспользоваться функцией `fftshift` с ограничением предела частоты от -2 до 2 кГц. Получившийся амплитудный спектр сигнала представлен на рис. 4.

Так как спектр симметричен, достаточно рассматривать только область положительных частот. Результат приведен на рис. 5, как видно, здесь присутствует гармоническая структура спектра.

При получении результата, представленного на рис. 6, для нахождения максимумов использовалась функция `findpeaks`. Данная функция используется для нахождения положительных или отрицательных пиков входных данных

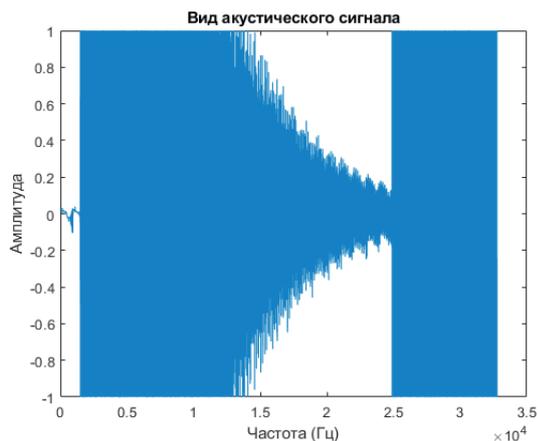


Рис. 1. Визуализация сигнала

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

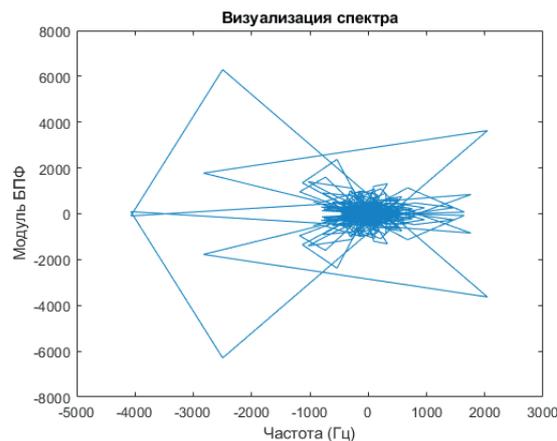


Рис. 2. Визуализация спектра обработанного сигнала с помощью БПФ

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

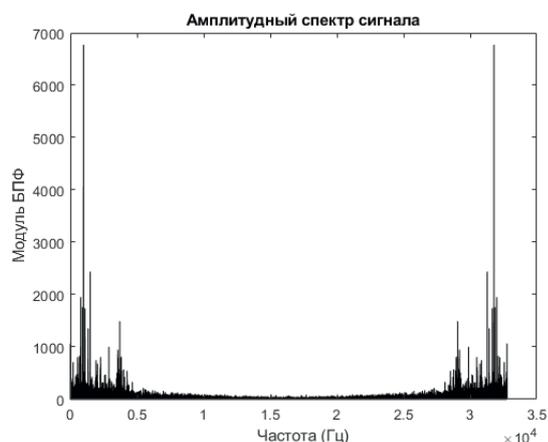


Рис. 3. Амплитудный спектр сигнала

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

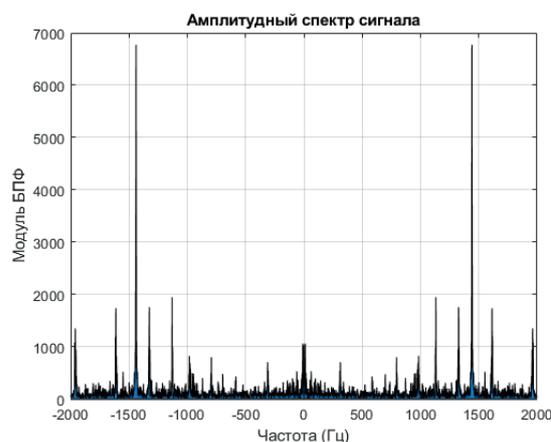


Рис. 4. Амплитудный спектр сигнала, отраженный относительно нуля

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

или сигнала и позволяет определить такие параметры, как местоположение пиков, их ширина и т. д. Функция `findpeaks` в MATLAB используется для нахождения пиков (локальных максимумов) во временном ряде или массиве данных. Она принимает в качестве аргумента массив данных и возвращает индексы локальных максимумов в этом массиве. Локальный максимум – это точка данных, которая больше значений соседних точек с обеих сторон и в результате возвращает координаты этих точек (индексы элементов массива) [8].

В данной работе использовался синтаксис `[peaks, locations] = findpeaks (data)`, в таком виде функция возвращает дополнитель-

но индексы, при которых происходят пики, где `peaks` – вектор значений максимумов, а `locations` – вектор индексов элементов массива `data`, на которых расположены найденные максимумы. Итоговый запрос для анализа данных выглядит как `[~, locs] = findpeaks (pxx, 'MinPeakHeight', 0.005, 'MinPeakDistance', nFFT/500)`, где `pxx` – это спектральная плотность мощности сигнала, а `nFFT` – длина сигнала БПФ [8].

При этом происходит округление значения частот и явно выявляется доминирующая частота 1449 Гц.

Чтобы убедиться, что расчеты, проведенные в MATLAB, верны, необходимо провести

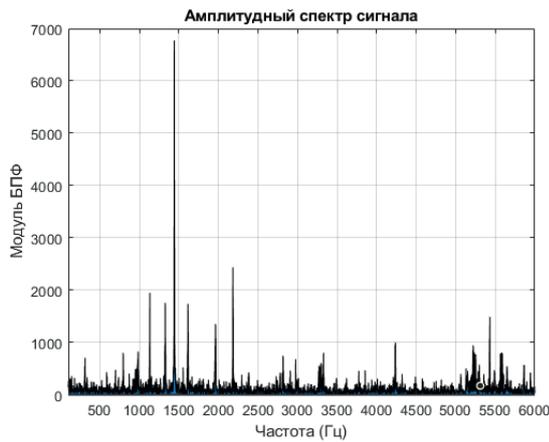


Рис. 5. Амплитудный спектр сигнала области положительных частот

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

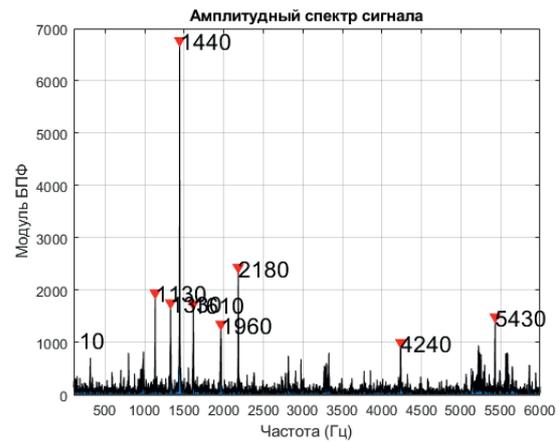


Рис. 6. Амплитудный спектр сигнала области положительных частот с определением амплитудных максимумов

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

обратное преобразование Фурье по измененным данным с помощью функции `ifft`.

Так как для эксперимента бралось достаточно большое количество точек для представлений, то в частотной области особых искажений сигнала после преобразования нет. Также это можно продемонстрировать на временном спектре амплитуд до и после эксперимента, изображенном на рис. 7 а–б соответственно.

На основе вышеописанного опыта можно убедиться, что с помощью БПФ можно выделить характерные частоты для определенного сигнала. Такой метод хорош для обработки единичного сигнала, для проведения анализа

частот в основном используют метод спектральной обработки сигнала.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Далее необходимо провести спектральный анализ, основываясь на методе БПФ.

Одна из особенностей спектральной обработки с помощью БПФ – это векторный вход алгоритма БПФ. Алгоритм всегда работает с массивами значений входного сигнала, и на выходе получается вектор комплексных отчетов спектра сигнала [8]. Алгоритм требует векторного входа, но отсчеты сигнала зачастую поступают скалярно, то есть по одному. Поэтому перед непосредственным БПФ осу-

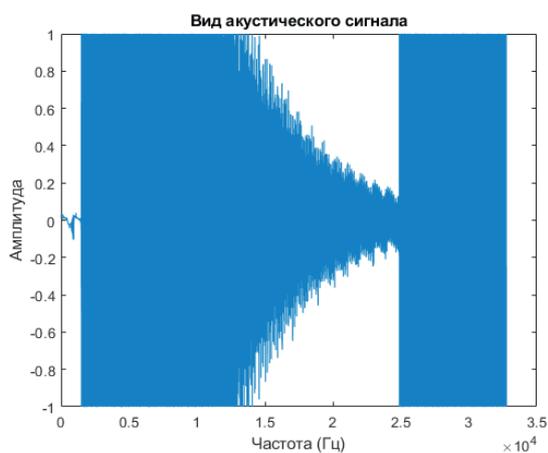


Рис. 7а. Сигнал до БПФ

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

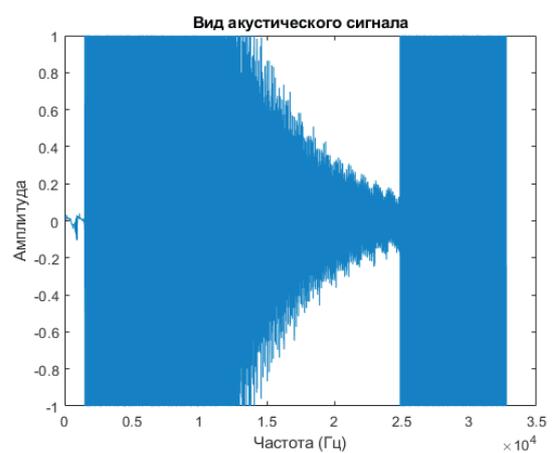


Рис. 7б. Сигнал после ОБПФ

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

ществляется буферизация, или накопление, отчетов в вектор.

В алгоритме БПФ важную роль играют окно и отсчеты, которые влияют на точность и качество спектральной обработки сигнала [9], где окном является входной вектор временных отсчетов, а отсчеты БПФ – это выходные временные отсчеты.

Для дискретного сигнала $x[n]$ формула для вычисления периодограммы выглядит следующим образом [10]:

$$P(f) = (|X(f)|^2)/N,$$

где $P(f)$ – СПМ для частоты f ,

$X(f)$ – комплексный спектр сигнала после применения БПФ,

$|X(f)|^2$ – квадрат модуля комплексного спектра (амплитуда мощности),

N – общее количество отсчетов в сигнале.

Эта формула представляет основной подход к вычислению СПМ. Однако существуют и другие методы, такие как периодограмма с использованием оконных функций, методы

сглаживания и интерполяции для улучшения точности и качества СПМ [10].

Спектральный анализ также выполнялся в программном обеспечении MATLAB. Входными данными является также периодический удар металлическим предметом по металлической конструкции в виде отрезка трубы, представленный на рис. 1.

В этом опыте воспользуемся функцией `pwelch` для оценки спектральной плотности мощности сигнала.

Входными параметрами являются: количества отсчетов входного вектора, длины БПФ, отсчетов перекрытия спектра, типа оконной функции и тип оконной функции, которая представлена на рис. 8. Входные параметры указаны в таблице.

После запуска основной функции `pwelch` получается график, представленный на рис. 9.

Разрешение рассчиталось в районе 2,92 Гц, значения положения пиков рассматриваются с точностью до 3 Гц, так как округляется функцией `round`.

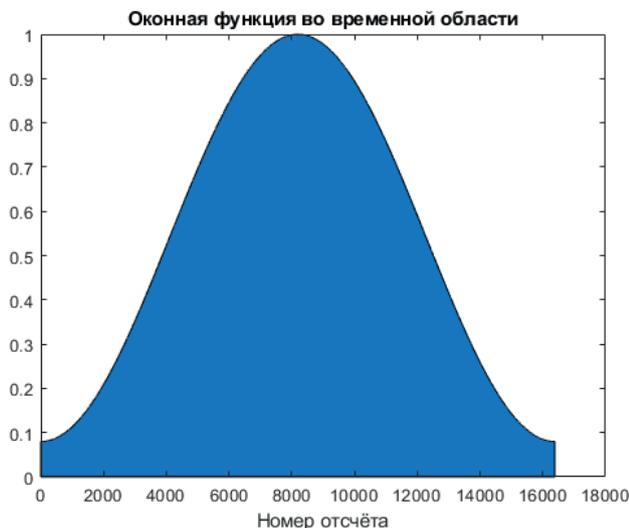


Рис. 8. Оконная функция во временной области

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.



Рис. 9. Спектральная плотность мощности сигнала

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Таблица

Входные параметры

Параметр	Значение
Длина входного вектора (входного окна)	2^{12}
Длина БПФ (N_{fft})	2^{14}
Количество отсчетов перекрытия	0
Тип оконной функции	Окно Хемминга

Примечание: составлено авторами.

При этом при увеличении окна переменной n window можно добиться подъема пиков и рассмотрения гармоник более детально, энергетики которых не хватало в коротком отрезке входного сигнала. А при увеличении количества точек БПФ переменной n FFT частотная сетка станет более плотной и положение пиков будет оцениваться более точно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, с помощью функции `pwelch` получилось добиться детального спектрального анализа, и при сравнении двух

экспериментов с обычным переводом в частотный спектр акустического сигнала и полноценного спектрального анализа можно прийти к выводу, что спектральная плотность мощности сигнала дает нам большую детализацию и больше информации о сигнале, чем обычный метод обработки быстрым преобразованием Фурье.

Далее планируется провести серию экспериментов с разным оборудованием и применением шумоподавления и сравнить полученные результаты для калибровки и, как следствие, более точной записи акустического сигнала в заданных условиях эксперимента.

Список источников

1. О магистральном трубопроводном транспорте : проект федер. закона Российской Федерации № 99045329-2. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902358183> (дата обращения: 19.01.2024).
2. Транспорт в России : стат. сб. М. : Росстат, 2022. 101 с.
3. Ущерб «Транснефти» от криминальных врезок в 2020 г. превысил 600 млн руб // Транснефть : официальный сайт. URL: <https://www.transneft.ru/media-center/newspress/publications/ushcherb-transnefti-ot-kriminalnykh-vrezok-v-2020-g-prevysil-600-mln-rub/> (дата обращения: 19.01.2024).
4. АО «Транснефть – Сибирь» ликвидирует последствия криминальной врезки на магистральном нефтепроводе в ХМАО-Югре // Транснефть : официальный сайт. URL: <https://siberia.transneft.ru/media-center/newspress/news/ao-transneft-sibir-likvidiruet-posledstviya-kriminalnoy-vrezki-na-magistralnom-nefteprovode-v-khmao/> (дата обращения: 19.01.2024).
5. Ахмеджанов Р. А., Федотов А. А. Способ обнаружения несанкционированных воздействий на трубопровод : патент 2676386C1 Рос. Федерация. № 2018102654 ; заявл. 23.01.2018 ; опубл. 28.12.2018. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2676386C1_20181228?ysclid=Isljscvzqg22421326 (дата обращения: 19.01.2024).
6. Романовский М. В., Солдатов А. И. Спектральная обработка акустических сигналов в системах физической защиты магистральных трубопроводов // Успехи кибернетики. 2023. Т. 4, № 1. С. 72–78. DOI 10.51790/2712-9942-2023-4-1-10.
7. Романовский М. В., Солдатов А. И. Исследование акустических сигналов несанкционированных действий на магистральных нефтегазотрубопроводах // Научные исследования: итоги и перспективы. 2023. Т. 4, № 4. С. 3–8. DOI 10.21822/2713-220X-2023-4-4-3-8.

References

1. Draft Federal Law of the Russian Federation No. 99045329-2 “On Main Pipeline Transport”. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902358183> (accessed: 19.01.2024). (In Russian).
2. Transport in Russia. Statistical databook. Moscow: Rosstat; 2022. 101 p. (In Russian).
3. *Transneft*. Ushcherb “Transnefti” ot kriminalnykh vrezok v 2020 g. prevysil 600 mln rub. URL: <https://www.transneft.ru/media-center/newspress/publications/ushcherb-transnefti-ot-kriminalnykh-vrezok-v-2020-g-prevysil-600-mln-rub/> (accessed: 19.01.2024). (In Russian).
4. *Transneft*. AO “Transneft – Sibir” likvidiruet posledstviya kriminalnoi vrezki na magistralnom nefteprovode v KhMAO-Iugre. URL: <https://siberia.transneft.ru/media-center/newspress/news/ao-transneft-sibir-likvidiruet-posledstviya-kriminalnoy-vrezki-na-magistralnom-nefteprovode-v-khmao/> (accessed: 19.01.2024). (In Russian).
5. Akhmedzhanov R. A., Fedotov A. A. Method for detecting unauthorized impact on pipeline. RU patent 2676386C1 No. 2018102654, filed January 23, 2018, issued December 28, 2018. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2676386C1_20181228?ysclid=Isljscvzqg22421326 (accessed: 19.01.2024). (In Russian).
6. Romanovskiy M. V., Soldatov A. I. Spectral processing of acoustic signals for pipeline security systems. *Russian Journal of Cybernetics*. 2023;4(1):72–78. DOI 10.51790/2712-9942-2023-4-1-10. (In Russian).
7. Romanovsky M. V., Soldatov A. I. Study of acoustic signals of unauthorized actions on main oil and gas pipelines. *Scientific Researches: Results and Prospects*. 2023;4(4):3–8. DOI 10.21822/2713-220X-2023-4-4-3-8. (In Russian).
8. MATLAB i bystroe preobrazovanie Fure. URL: <https://hub.exponenta.ru/post/matlab-i-bystroe-preobrazovanie-fure356> (accessed: 19.01.2024). (In Russian).

8. MATLAB и быстрое преобразование Фурье. URL: <https://hub.exponenta.ru/post/matlab-i-bystroie-preobrazovanie-fure356> (дата обращения: 19.01.2024).
9. Шамсиев Э. Х., Павлов А. Д. Методы голосовой идентификации человека // Профессиональные коммуникации в научной среде – фактор обеспечения качества исследований : сб. материалов XI Всерос. науч.-практич. конф., 16–17 марта 2022 г., г. Альметьевск. СПб. : ООО «Скифия-принт», 2022. С. 138–142.
10. Кандидов В. П., Чесноков С. С., Шленов С. А. Дискретное преобразование Фурье. М. : МГУ, 2019. 88 с.
9. Shamsiev E. Kh., Pavlov A. D. Human voice identification methods. In: *Proceedings of the 11th All-Russian Research-to-Practice Conference “Professionalnye kommunikatsii v nauchnoi srede – faktor obespecheniia kachestva issledovaniia”*, March 16–17, 2022, Almetьевsk. St. Petersburg: ООО Skifiia-print; 2022. p. 138–142. (In Russian).
10. Kandidov V. P., Chesnokov S. S., Shlenov S. A. Diskretnoe preobrazovanie Fure. Moscow: MSU; 2019. 88 p. (In Russian).

Информация об авторах

М. В. Романовский – аспирант.

А. И. Солдатов – доктор технических наук, профессор.

Information about the authors

M. V. Romanovsky – Postgraduate.

A. I. Soldatov – Doctor of Sciences (Engineering), Professor.

Научная статья
УДК 004.896:621.311
DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-9

РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НЕПРЯМОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫРАБАТЫВАЕМОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ КАК ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Екатерина Александровна Энгель^{1✉}, Никита Евгеньевич Энгель²

^{1, 2}Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова, Абакан, Россия

¹ekaterina.en@gmail.com[✉], <https://orcid.org/0000-0002-3023-0195>

²nikita.en@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7216-6398>

Аннотация. Прогноз вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции позволяет эффективно и безопасно управлять электрическими сетями, интегрирующими кластер солнечных электростанций. Штрафные тарифы закупки рынка «сутки вперед» электроэнергии солнечных электростанций, отклоняющейся более чем на 5% максимальной мощности солнечной электростанции от предоставляемого почасового макета рынка «сутки вперед» выработки солнечной электростанции, актуализируют повышение точности макета рынка «сутки вперед» путем создания эффективных интеллектуальных систем прогнозирования выработки солнечной электростанции. Проведенный анализ существующего программного обеспечения показал отсутствие доступного программного обеспечения для эффективного прогноза выработки солнечной электростанции, целесообразность и актуальность создания ПО, реализующего интеллектуальную систему прогнозирования выработки солнечной электростанции. В настоящем исследовании разработана, апробирована и реализована как программа для ЭВМ на основе модифицированной нечеткой нейросети с механизмом внимания интеллектуальная система непрямого прогнозирования выработки солнечной электростанции. В нотации UML CASE-средством Microsoft Visio созданы диаграмма классов и блочно-модульная архитектура программы для ЭВМ, реализующей интеллектуальную систему непрямого прогнозирования выработки солнечной электростанции. Гибкость созданной программы для ЭВМ обеспечивает блочно-модульная архитектура. Апробация программы для ЭВМ, реализующей интеллектуальную систему непрямого прогнозирования выработки солнечной электростанции, отражает ее эффективные, робастные результаты и целесообразность ее применения для построения макетов рынка «сутки вперед». База данных SCADA солнечной электростанции легко интегрируется с интеллектуальной системой непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции.

Ключевые слова: нечеткая нейросеть, механизм внимания, рекуррентная нейросеть, UML

Благодарности: исследование выполнено в рамках мероприятия «Разработка интеллектуальных систем прогнозирования и максимизации выработки электроэнергии солнечной электростанции на основе оригинальной модифицированной нечеткой нейросети, их реализация как программ для ЭВМ и внедрение на электростанции возобновляемых источников энергии» программы деятельности НОЦ мирового уровня «Енисейская Сибирь».

Финансирование: исследование выполнено за счет средств гранта министерства образования и науки Республики Хакасия (Соглашение № 91 от 13.12.22) научно-исследовательский проект «Разработка интеллектуальной системы непрямого прогнозирования выработки электроэнергии солнечной электростанции на основе модифицированной нечеткой нейросети».

Для цитирования: Энгель Е. А., Энгель Н. Е. Реализация интеллектуальной системы непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции как программы для ЭВМ // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 1. С. 68–74. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-9.

Original article

IMPLEMENTING AN INTELLIGENT SYSTEM OF INDIRECT FORECASTING OF SOLAR POWER GENERATION AS COMPUTER SOFTWARE

Ekaterina A. Engel¹, Nikita E. Engel²

^{1,2}Katanov Khakass State University, Abakan, Russia

¹ekaterina.en@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3023-0195>

²nikita.en@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7216-6398>

Abstract. The forecasting of electric power generated by a solar power plant enables effective and safe control over electric networks which integrate a cluster of solar power plants. Penalty rates for the purchase of solar power at the day-ahead market, which deviates by more than 5 % of the maximum capacity of solar power plants from the provided hourly model of the day-ahead market of solar power generation, update the accuracy of the day-ahead market model through effective intelligent systems for forecasting solar power generation. It has been found that there is no accessible software for successful forecasting of solar power generation; the advisability and relevance of designing such software with an intelligent system have been shown based on the findings of the examined existing software. The study developed, tested and implemented an intelligent system of indirect forecasting of solar power generation in the form of computer software designed based on a modified fuzzy neural network with an attention mechanism. A class diagram and a block-modular architecture for computer software that implements an intelligent system of indirect forecasting of solar power generation were developed in UML notes using the Microsoft Visio CASE tool. A block-modular architecture provides the flexibility of computer software. The computer software implementing an intelligent system of indirect forecasting for solar power generation was tested for effectiveness, robust results, and the advisability of its application for building a day-ahead market model. The SCADA database of a solar power plant can be easily integrated with an intelligent system of indirect forecasting of solar power generation.

Keywords: fuzzy neural network, attention mechanism, recurrent neural network, UML

Acknowledgments: the research is conducted as part of the event “The Development of Intelligent Systems of Forecasting and Maximizing Solar Power Generation Based on the Original Modified Fuzzy Neural Network, Their Implementation as Computer Software and Introduction of Renewable Energy Sources to the Power Plant” of the action program of the ANO “Yenisey Siberia Development Corporation”.

Funding: the study is supported by the grant of the Ministry of Education and Science of the Republic of Khakassia (Agreement No. 91 of December 13, 2022) of a research project “Development of an Intelligent System of Indirect Forecasting of Electric Power Generation by a Solar Power Plant Based on the Modified Fuzzy Neural Network”.

For citation: Engel E. A., Engel N. E. Implementing an intelligent system of indirect forecasting of solar power generation as computer software. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(1):68–74. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-9.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с несколькими приоритетами научно-технологического развития РФ (20 а, б) [1] актуальны результаты данного научного исследования, развивающие интеллектуальные системы солнечной энергетики в Российской Федерации, в том числе для Республики Хакасия, имеющей богатый природный потенциал для увеличения мощности сети солнечных электростанций (величина инсоляции соответствует уровню инсоляции

Краснодарского края [2]). Прогноз вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции позволяет эффективно и безопасно управлять электрическими сетями, интегрирующими кластер солнечных электростанций [3]. Штрафные тарифы закупки рынка «сутки вперед» электроэнергии солнечных электростанций, отклоняющейся более чем на 5% максимальной мощности солнечной электростанции от предоставляемого почасового максимума рынка «сутки вперед» вырабатываемой

электроэнергии солнечной электростанции, актуализируют повышение точности макета рынка «сутки вперед» путем создания эффективных интеллектуальных систем прогнозирования выработки солнечной электростанции. Нелинейную динамику выработки солнечной электростанции, зависящую от колебаний инсоляции и температуры воздуха линейно и нелинейно соответственно [4], сложно прогнозировать традиционными алгоритмами, в то время как интеллектуальные системы прогнозирования выработки солнечной электростанции в отличие от классических, например интегрированной авторегрессии и т. д., имеют следующие достоинства: допустимую погрешность макета рынка «сутки вперед», оптимальное управление сегментом солнечных электростанций электрических сетей. Интеллектуальные системы, основанные на нейросетях, имеют преимущество параллельных вычислений, в том числе с использованием современных графических процессоров, что значительно снижает временные затраты на обработку больших данных SCADA для прогноза выработки электроэнергии солнечной электростанции [3].

Существующее программное обеспечение (ПО), ориентированное на проектирование солнечных электростанций, выдает примерную среднемесячную вырабатываемую электроэнергию солнечной электростанции для заданной широты и долготы места.

SolarSoft: это ПО для проектирования солнечных электростанций, предлагающее инструменты для моделирования, выполнения расчетов и создания 3D-макета установки [5].

Solar Array Simulator: это ПО, которое позволяет создавать и тестировать макеты солнечных батарей и электростанций в виртуальном пространстве [6].

NREL System Advisor Model (SAM): позволяет проводить технологически сложные моделирования и анализ возможностей солнечных электростанций с учетом географических особенностей, климата и других факторов [7].

Helioscope: это ПО для проектирования солнечных электростанций, которое также обеспечивает возможности для оптимизации и анализа производства энергии [8].

ПО Aurora Solar предоставляет инструменты для оптимизации установки солнечных панелей с учетом тени от окружающих объектов и других факторов, влияющих на производительность солнечных панелей [9].

Средства Photovoltaic Geographical Information System – Interactive Maps [10] позволяют вычислить среднемесячные значения температуры, солнечной радиации ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$) и выработки солнечной электростанции ($\text{кВт}\cdot\text{ч}$), соответствующие широте и долготе местоположения солнечной электростанции.

SolarServer – PV forecast Europe обеспечивает для заданной широты и долготы местности оптимизацию угла установки, ориентации панелей, а также онлайн-прогнозирование выработки солнечной электростанции [11].

PVsyst представляет собой ПО, обладающее широким спектром моделирования различных фотоэлектрических массивов в разных условиях [12].

Clean Power Research – это компания, которая разрабатывает ПО для анализа и оптимизации солнечных электростанций. Ее ПО включают в себя инструменты для прогнозирования производства электроэнергии, оценки эффективности установленных солнечных панелей и оптимизации их размещения [13].

Все описанные выше существующие ПО представляют собой своеобразные калькуляторы прогноза выработки солнечной электростанции на основе теоретической инсоляции и температуры и не ориентированы на краткосрочное прогнозирование на основе фактической инсоляции и температуры, поэтому не могут обеспечить реализацию поставленной цели настоящего исследования. Таким образом, проведенный анализ существующего ПО показал:

- отсутствие доступного программного обеспечения для эффективного прогноза выработки солнечной электростанции;

- целесообразность и актуальность создания интеллектуальной технологии прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции.

В настоящем исследовании разработана, апробирована и реализована как программа для

ЭВМ на основе модифицированной нечеткой нейросети с механизмом внимания (МННС) интеллектуальная система непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции (ИСПВЭСЭ), подробно описанная в работах авторов [14, 15]. В нотации UML CASE-средством Microsoft Visio созданы диаграмма классов и блочно-модульная архитектура программы для ЭВМ, реализующей ИСПВЭСЭ. Гибкость и легкую модифицируемость программы для ЭВМ, простоту добавления новых модулей обеспечивает блочно-модульная архитектура.

Апробация способствующей импортозамещению программы для ЭВМ, реализующей ИСПВЭСЭ, отражает ее эффективные, робастные результаты и целесообразность ее применения для построения макетов рынка «сутки вперед». База данных SCADA солнечной электростанции легко интегрируется ИСПВЭСЭ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Интеллектуальные технологии прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции составляют виртуальную цифровую реальность, обеспечивающую безопасность и эффективность солнечной энергетики, включая ее интеграцию в электрические сети. Описанные в работе авторов [14, 15] результаты ИСПВЭСЭ отражают:

- ее робастность в условиях неопределенности и уменьшение среднеквадратичной ошибки ее прогноза в среднем в три и шесть раз в сравнении с рекуррентными нейросетями и стандартной моделью ARMA;
- целесообразность проектирования и реализации как программы для ЭВМ ИСПВЭСЭ, описанной в работе авторов [14].

Блочно-модульная архитектура разработанной для ЭВМ программы обеспечивает ее гибкость, легкую модификацию имеющихся и добавление вновь разработанных модулей, реализующих вспомогательные методы, например интеграцию с аппаратным обеспечением инвертора и/или бесконтактную верификацию пользователя (описание которых выходит за рамки настоящей статьи). Ядром способствующей импортозамещению программы для ЭВМ, реализующей ИСПВЭСЭ, является модуль МННС. Таким образом, модуль солнечной электростанции можно заменить другим модулем, реализующим, например, ветровую электростанцию. Реализованная CASE-средством Microsoft Visio блочно-модульная архитектура программы для ЭВМ, реализующей ИСПВЭСЭ, состоит из трех модулей (рис. 1). База данных SCADA солнечной электростанции легко интегрируется ИСПВЭСЭ на основе модуля управления данными.

Созданная в нотации UML средствами Microsoft Visio диаграмма классов указанной программы для ЭВМ состоит из 6 классов, имеющих многоуровневую иерархию (рис. 2).

Базовым классом для ИСПВЭСЭ является МННС с методами структурно-параметрического синтеза, диагностического функционирования и масштабированной коррекции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Средствами программы для ЭВМ, реализующей ИСПВЭСЭ, сгенерированы макеты рынка «сутки вперед» на основе трехлетнего архива табличных данных фактической вырабатываемой электроэнергии Абаканской солнечной электростанции I_h^t и вектора:

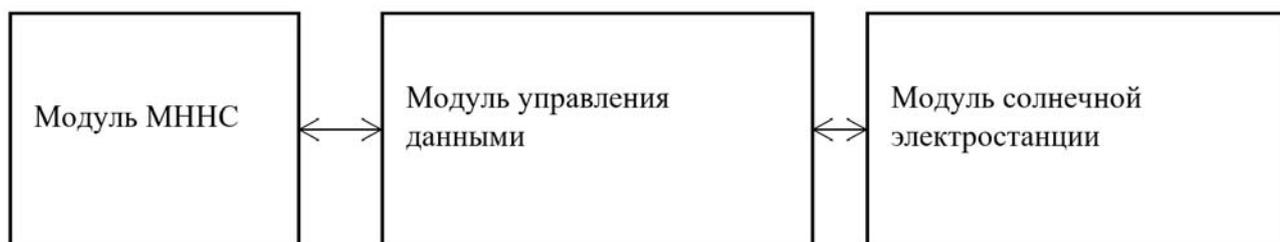


Рис. 1. Блочно-модульная архитектура программы для ЭВМ, реализующей ИСПВЭСЭ

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

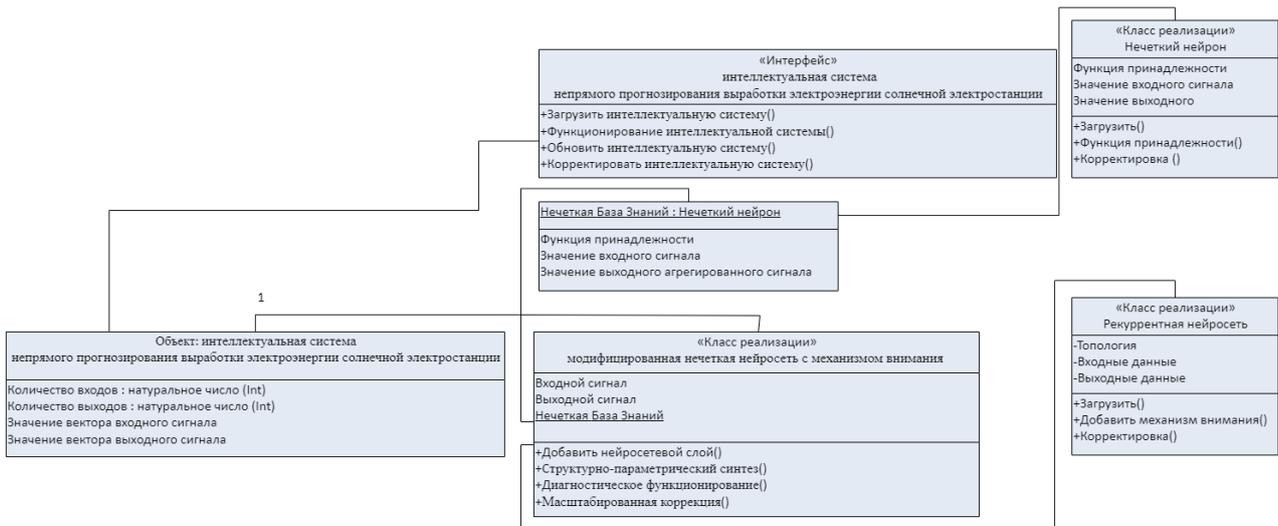


Рис. 2. UML-диаграмма классов ИСПВЭСЭ

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

$$X_h^t = (C_h^{t-2-m}, I_h^{t-2-m}, l_h^{t-m}, T_h^{t-m}, P_h^{t-m}, W_h^{t-m}, d_h^{t-m}), \quad (1)$$

где C_h^{t-2-m} – индекс ясного неба, l_h^t – облачность (%),

T_h^{t-m} – температура воздуха,

P_h^{t-m} – атмосферное давление,

W_h^{t-m} и d_h^{t-m} – скорость и направление ветра

соответственно,

T_h^{t-m} – температура воздуха,

m – размер окна прогнозирования, $m = 0..14, 361..369, h \in \{5, \dots, 23\}, t \in \{370, \dots, 1095\}$.

Кривые фактической и прогнозируемой средствами разработанной для ЭВМ программы

выработки Абаканской солнечной электростанции (рис. 3) отражают приемлемую точность (таблица) сгенерированных разработанной программой для ЭВМ макетов рынка «сутки вперед» для последнего месяца архивных табличных данных (1).

Эффективность сгенерированных макетов рынка «сутки вперед» для последнего месяца архива данных (1) оценена как среднеквадратичная ошибка (RMSE) и абсолютная ошибка, диктуемая рынком «сутки вперед» (AER): допустимая погрешность макета рынка «сутки вперед» солнечной электростанции не должна превышать 5% от ее мощности.

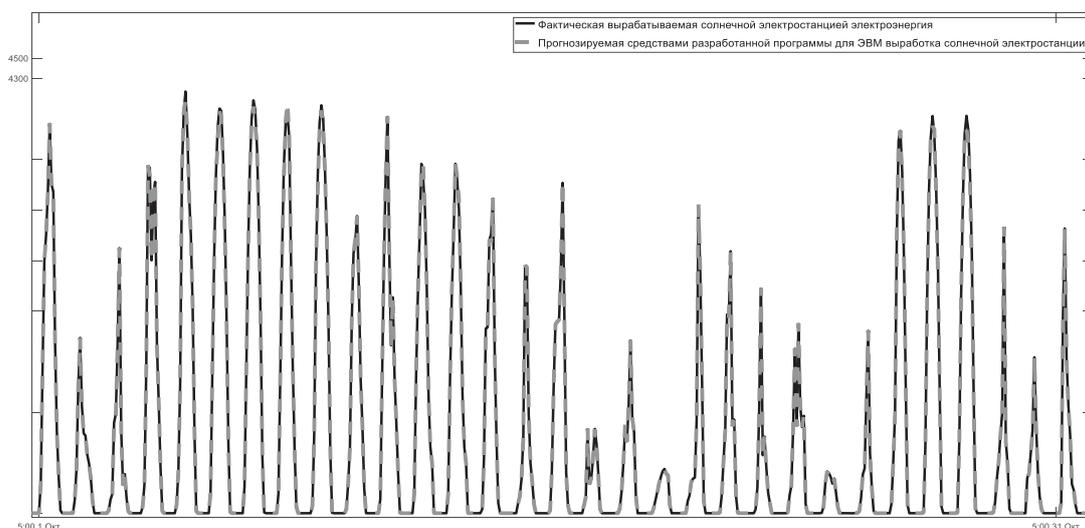


Рис. 3. Фактическая и прогнозируемая средствами разработанной для ЭВМ программы выработка солнечной электростанции

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Эффективность сгенерированных макетов рынка «сутки вперед»

Ошибка	МННС
AER	0
RMSE	16,7

Примечание: МННС – модифицированная нечеткая нейросеть с механизмом внимания; AER – абсолютная ошибка, диктуемая рынком «сутки вперед»; RMSE – среднеквадратичная ошибка. Составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

RMSE вычислялась согласно выражению:

$$RSME = \frac{1}{31} \sum_{t=1064}^{1095} \left(\sum_{h=5}^{23} (I_h^t - P_h^t)^2 \right), \quad (2)$$

где P_h^t – прогнозируемая величина выработки солнечной электростанции, I_h^t – фактическая величина выработки солнечной электростанции.

AER вычислялась согласно выражению:

$$AER = \sum_{t=1064}^{1095} \left(\sum_{h=5}^{23} \left[\sum_{\text{если } |I_h^t - P_h^t| > 260} (|I_h^t - P_h^t| - 260) \right] \right). \quad (3)$$

Анализ качества непрямого прогноза выработки солнечной электростанции, отраженный в таблице, показывает целесообразность применения программы для ЭВМ, реализующей ИСПВЭСЭ для построения макетов рынка «сутки вперед».

Список источников

1. Большие вызовы и приоритеты научно-технологического развития. URL: <https://xn--mlagf.xn--plai/challenges-priorities/> (дата обращения: 20.01.2024).
2. Значение солнечной инсоляции в г. Абакан (Республика Хакасия). URL: <https://www.betaenergy.ru/in-solation/abakan/> (дата обращения: 20.01.2024).
3. Engel E., Engel N. A review on machine learning applications for solar plants. *Sensors (Basel)*. 2022;22(23):9060.
4. Liu L., Liu D., Sun Q. et al. Forecasting power output of photovoltaic system using a BP network method. *Energy Procedia*. 2017;142:80–786.
5. SolarSoft. URL: <https://www.lmsal.com/solarsoft/> (дата обращения: 20.01.2024).
6. Solar Array Simulator DC Power Supply. URL: <https://www.chromausa.com/product/solar-array-simulator/> (дата обращения: 20.01.2024).
7. NREL. System Advisor Model (SAM). URL: <https://sam.nrel.gov> (дата обращения: 20.01.2024).
8. Helioscope. URL: <https://helioscope.aurorasolar.com> (дата обращения: 20.01.2024).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании разработана, апробирована и реализована как программа для ЭВМ ИСПВЭСЭ на основе МННС. Разработаны UML-диаграмма классов и блочно-модульная архитектура программы для ЭВМ, реализующей ИСПВЭСЭ, обеспечивающая гибкость, легкую модификацию имеющихся и добавление вновь разработанных модулей реализованной для ЭВМ программы.

Апробация способствующей импортозамещению программы для ЭВМ, реализующей ИСПВЭСЭ, отражает ее эффективные, робастные результаты и целесообразность ее применения для построения макетов рынка «сутки вперед».

References

1. Bolshie vyzovy i priorityety nauchno-tekhnologicheskogo razvitiia. URL: <https://xn--mlagf.xn--plai/challenges-priorities/> (accessed: 20.01.2024). (In Russian).
2. Znachenie solnechnoi insoliatsii v g. Abakan (Respublika Khakasiia). URL: <https://www.betaenergy.ru/in-solation/abakan/> (accessed: 20.01.2024). (In Russian).
3. Engel E., Engel N. A review on machine learning applications for solar plants. *Sensors (Basel)*. 2022;22(23):9060.
4. Liu L., Liu D., Sun Q. et al. Forecasting power output of photovoltaic system using a BP network method. *Energy Procedia*. 2017;142:80–786.
5. SolarSoft. URL: <https://www.lmsal.com/solarsoft/> (accessed: 20.01.2024).
6. Solar Array Simulator DC Power Supply. URL: <https://www.chromausa.com/product/solar-array-simulator/> (дата обращения: 20.01.2024).
7. NREL. System Advisor Model (SAM). URL: <https://sam.nrel.gov> (accessed: 20.01.2024).
8. Helioscope. URL: <https://helioscope.aurorasolar.com> (accessed: 20.01.2024).

9. Aurora. URL: <https://aurorasolar.com> (дата обращения: 20.01.2024).
10. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). URL: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?map=africa&lang=en> (дата обращения: 20.01.2024).
11. SolarServer. PV forecast Europe. URL: <https://www.solarserver.com/service/solar-photovoltaic-power-forecast-for-worldwide-locations/pv-forecast-europe.html> (дата обращения: 20.01.2024).
12. PVsyst. Download. URL: <http://www.pvsyst.com/en/software/download> (дата обращения: 20.01.2024).
13. Clean Power Research. URL: <https://www.cleanpower.com> (дата обращения: 20.01.2024).
14. Энгель Е. А., Энгель Н. Е. Система непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии массивом солнечных панелей на основе модифицированной нечеткой нейросети // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 16, № 6. С. 744–758.
15. Энгель Е. А., Энгель Н. Е. Интеллектуальная система прогнозирования температуры на основе модифицированной нечеткой нейросети // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 3. С. 76–81.
9. Aurora. URL: <https://aurorasolar.com> (accessed: 20.01.2024).
10. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). URL: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?map=africa&lang=en> (accessed: 20.01.2024).
11. SolarServer. PV forecast Europe. URL: <https://www.solarserver.com/service/solar-photovoltaic-power-forecast-for-worldwide-locations/pv-forecast-europe.html> (accessed: 20.01.2024).
12. PVsyst. Download. URL: <http://www.pvsyst.com/en/software/download> (accessed: 20.01.2024).
13. Clean Power Research. URL: <https://www.cleanpower.com> (accessed: 20.01.2024).
14. Engel E. A., Engel N. E. An indirect forecasting system of the power from a solar panel array based on modified fuzzy neural network. *J Sib Fed Univ Eng Technol.* 2023;16(6):744–758. (In Russian).
15. Engel E. A., Engel N. E. An intelligent system for temperature forecasting based on a modified fuzzy neural network. *Proceedings in Cybernetics.* 2023;22(3):76–81. (In Russian).

Информация об авторах

Е. А. Энгель – кандидат технических наук, доцент.
Н. Е. Энгель – бакалавр.

Information about the authors

E. A. Engel – Candidate of Sciences (Engineering),
Docent.
N. E. Engel – Bachelor's Degree Student.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 531.747.5

DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-10

ЗАВИСИМОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ВОДНОГО РАСТВОРА ХЛОРИДА НАТРИЯ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Александр Геннадьевич Заводовский

Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

averin117@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе выполнено исследование поверхностного натяжения на границе воздух – водный раствор хлорида натрия с помощью высокочувствительного метода вращающейся капли на тензиометре SDT фирмы KRUSS. Определена изотерма поверхностного натяжения при температуре 20 °С в интервале концентрации 0–25%. Для разных значений концентрации получена температурная зависимость коэффициента поверхностного натяжения в интервале от 20 до 70 °С. Определен температурный коэффициент поверхностного натяжения $\alpha = 0,18 \text{ мН}/(\text{м}\times\text{К})$.

Ключевые слова: поверхностное натяжение, водный раствор хлорида натрия, метод вращающейся капли, изотерма поверхностного натяжения

Для цитирования: Заводовский А. Г. Зависимость поверхностного натяжения водного раствора хлорида натрия от концентрации и температуры // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 1. С. 75–80. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-10.

Original article

CONCENTRATION AND TEMPERATURE DEPENDENCY OF THE SALINE SURFACE TENSION

Aleksandr G. Zavodovsky

Surgut State University, Surgut, Russia

averin117@mail.ru

Abstract. The article describes an experiment of a surface tension on the air – saline interface using a highly sensitive rotating drop method conducted on the SDT tensiometer of the KRUSS company. The surface tension isotherm was estimated at +20 °C in concentrations of 0 to 25 %. The temperature dependency of the surface tension coefficient was determined for various concentration readings within the range of +20 to +70 °C. The temperature coefficient of the surface tension (α) was estimated as 0.18 mN/(m×K).

Keywords: surface tension, saline, rotating drop method, surface tension isotherm

For citation: Zavodovsky A. G. Concentration and temperature dependency of the saline surface tension. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(1):75–80. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-10.

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностно-инактивными называются вещества, которые увеличивают поверхностное натяжение раствора. По отношению к воде такими веществами являются кислоты, щелочи и соли. Большой объем известных литера-

турных данных посвящен определению поверхностного натяжения водных растворов солей хлоридов щелочных металлов. Однако эти данные получены в небольшом интервале температур и концентраций раствора [1]. Также отмечалось, что при увеличении количества

соли в растворе на границе с воздухом происходит близкое к линейному возрастание поверхностного натяжения, но опыт показывает, что связь является более сложной [2]. Методом капиллярного поднятия было установлено наличие минимума на изотерме поверхностного натяжения в области низких концентраций для нескольких водно-солевых систем (эффект Джонса – Рэя), в том числе и для раствора поваренной соли [3]. В настоящее время предполагается, что этот эффект может быть связан с методикой измерения поверхностного натяжения.

В работе [4] на основании анализа опытных данных делается вывод, что с увеличением температуры раствора поверхностное натяжение уменьшается. Причем для водного раствора хлорида натрия с концентрацией 20% эта зависимость оказалась линейной [5]. Для проведения опытных исследований обычно использовались различные классические методы: метод максимального давления в пузырьке, метод капиллярного поднятия, капельный метод, анализ оптического изображения сидящей на подложке капли и другие [6]. Таким образом, для более глубокого понимания механизма поверхностного натяжения важны экспериментальные исследования поверхностных явлений в водно-солевых системах, выполненные с помощью более чувствительных экспериментальных методов. В данной работе опытным путем была изучена зависимость поверхностного натяжения водного раствора хлорида натрия на границе с воздухом от концентрации соли и температуры раствора методом вращающейся капли [7]. Этот метод был ранее использован для определения межфазного натяжения на границе жидкость–жидкость [8].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения опытных исследований использовался тензиометр SDT фирмы KRUSS, возможности которого позволяют проводить определение поверхностного натяжения на границе газ–жидкость и жидкость–жидкость с очень высокой степенью точности. С помощью тензиометра SDT можно теоретически измерить межфазное натяжение в интервале от 10^{-6} до 2000 мН/м, однако реаль-

ный диапазон и точность измерения могут быть ограничены свойствами конкретного образца. Экспериментальная установка состоит из монитора 1, главной консоли 2, системного блока 3 и термостата 4 (рис. 1).

На главной консоли (рис. 2) расположены измерительная ячейка 1, дисплей 2 и ручки управления 3.

В измерительной ячейке размещаются капилляр с исследуемым образцом и видеокamera контроля диаметра пузырька воздуха. Дисплей панели управления используется для вывода информации и ее контроля. Ручки и кнопки консоли применяются для базовых настроек скорости вращения, температуры раствора и подсветки капилляра.

В измерительной установке для создания необходимой температуры капилляра используется циркуляционный термостат KISS K6. С помощью термостата можно поддерживать температуру образца в интервале от 0 до 100 °С с точностью ± 1 °С.

Тензиометр SDT позволяет измерять межфазное натяжение на границе воздух – водный раствор соли. Для этого горизонтальный капилляр заполняется раствором, а пузырек воздуха вводится в него с помощью шприца. Капилляр помещается в рабочую кювету и вращается в ней. Межфазное натяжение коррелируется с диаметром или кривизной пузырька, который вытягивается в цилиндр под действием центробежных сил. Обработка результатов производится с помощью специальной программы системного блока. Программа ADVANCE выполняет анализ изображения (рис. 3) по функции приближения Воннегута и, определяя скорость вращения и температуру образца, производит расчет коэффициента поверхностного натяжения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента поверхностного натяжения (изотерма) на границе водный раствор хлорида натрия – воздух от концентрации соли при температуре 20 °С.

Для приготовления исследуемого раствора использовались дистиллированная вода

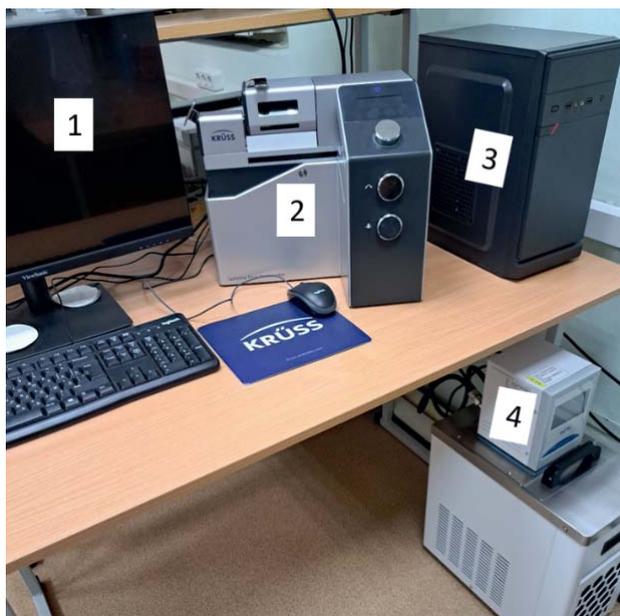


Рис. 1. Тензиометр SDT фирмы KRÜSS
Примечание: составлено автором.

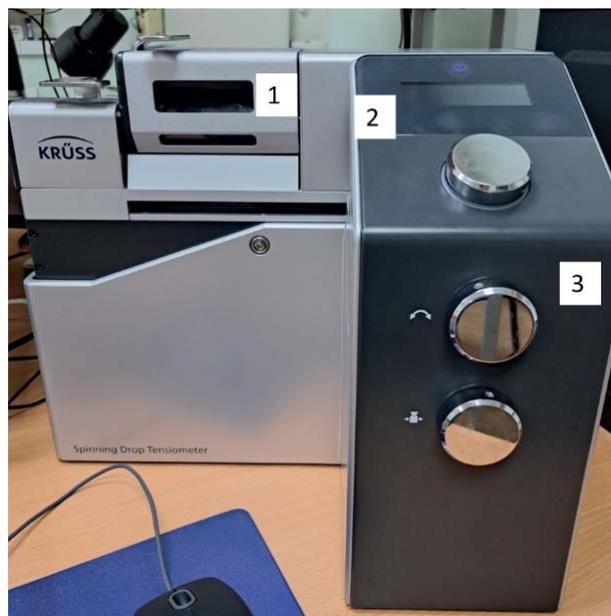


Рис. 2. Главная консоль тензиометра
Примечание: составлено автором.

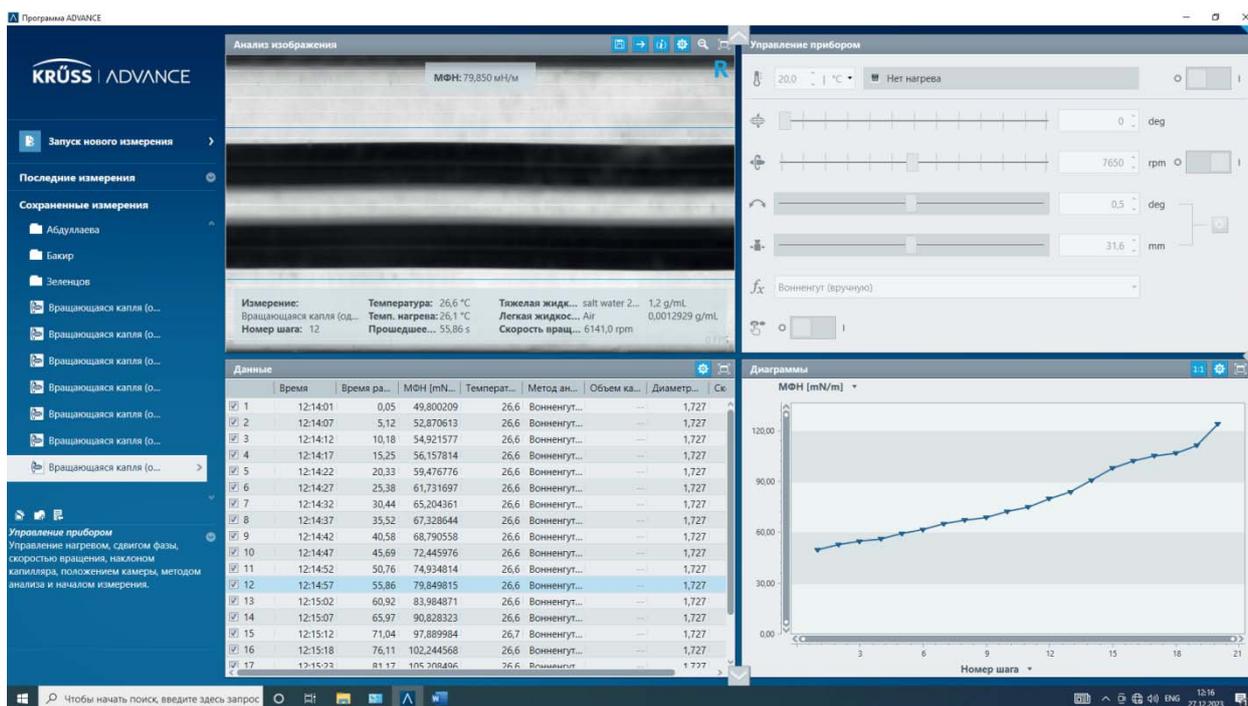


Рис. 3. Результаты анализа изображения пузырька воздуха в растворе хлорида натрия с помощью программы ADVANCE (скриншот экрана монитора)
Примечание: составлено автором.

и пищевая поваренная соль (массовая доля хлорида натрия не менее 99,7%). Для экспериментальных исследований были подготовлены растворы с концентрацией соли до 25%, т.к. уже при 26% наблюдалось выпадение в растворе осадка. Точность приготовления концентрации раствора составляла

$\pm 0,1\%$. Значение коэффициента поверхностного натяжения определялось с точностью $\pm 0,1$ мН/м.

Опытные результаты сравнивались с известными данными [9], полученными при небольших концентрациях раствора (5 и 10%) и температуре 20 °С. Анализ изо-

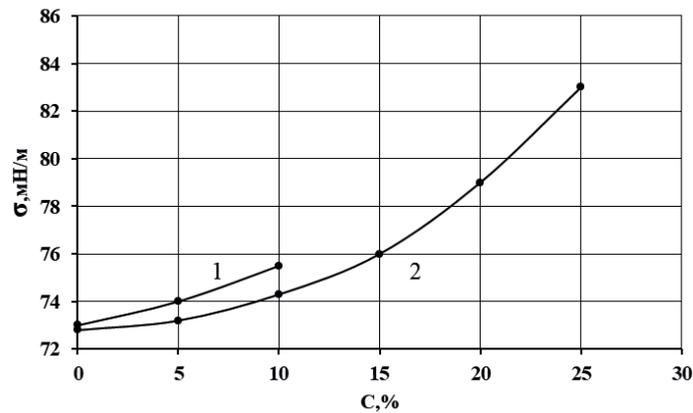


Рис. 4. Изотерма поверхностного натяжения на границе водный раствор хлористого натрия – воздух (температура раствора $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 – данные работы [9], 2 – экспериментальные результаты)

Примечание: составлено автором.

термы показывает, что при увеличении концентрации соли в растворе поверхностное натяжение увеличивается, при этом увеличение является нелинейным и наличие минимума на изотерме (эффект Джонса – Рэя) не наблюдается. При малых значениях концентрации (до 10%) увеличение поверхностного натяжения небольшое и немного отличается (меньше) от литературных данных.

На рис. 5 представлены результаты температурных исследований поверхностного натяжения при концентрации раствора $C = 20\%$.

Анализ данных показывает, что при увеличении температуры раствора коэффициент поверхностного натяжения линейно уменьшается, что подтверждает выводы рабо-

ты [5]. Наблюдаемая разница в результатах (рис. 4 и 5) может быть связана с величиной массовой доли хлорида натрия в поваренной соли, используемой в эксперименте, а также с применяемой в данной работе методикой определения поверхностного натяжения.

На рис. 6 представлены результаты температурных исследований поверхностного натяжения при различных значениях концентрации раствора.

Зависимость 3 на рис. 6 получена для чистой воды. Для нее определен температурный коэффициент поверхностного натяжения $\alpha = 0,16\text{ мН}/(\text{м}\times\text{К})$. Экспериментальные результаты для воды совпадают с табличными данными [9]. Анализ опытных зависимостей для разных концентраций водного раствора

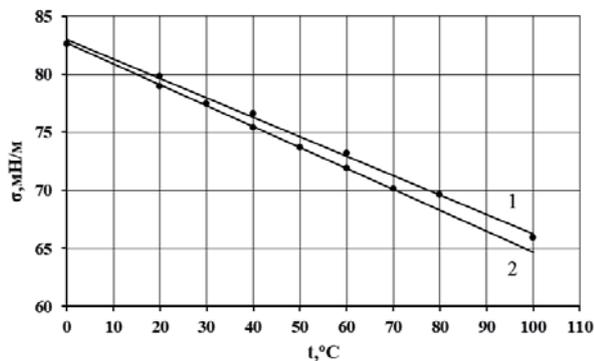


Рис. 5. Температурная зависимость поверхностного натяжения на границе воздух – водный раствор хлорида натрия (концентрация раствора $C = 20\%$, 1 – данные работы [5], 2 – экспериментальные результаты)

Примечание: составлено автором.

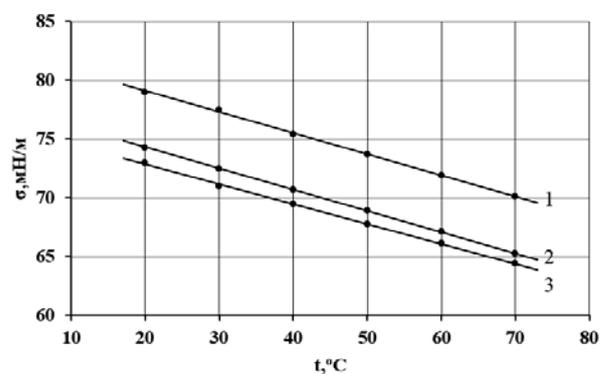


Рис. 6. Температурная зависимость поверхностного натяжения на границе воздух – водный раствор хлорида натрия при различных концентрациях раствора (1 – $C = 20\%$, 2 – $C = 10\%$, 3 – $C = 0\%$)

Примечание: составлено автором.

хлорида натрия показывает, что с увеличением температуры раствора поверхностное натяжение линейно уменьшается с температурным коэффициентом, равным $\alpha = 0,18 \text{ мН}/(\text{м}\times\text{К})$. Причем величина коэффициента не зависит от концентрации раствора. Уменьшение поверхностного натяжения связано с тем, что с ростом температуры увеличивается интенсивность теплового движения молекул жидкости и в результате ослабляется межмолекулярное взаимодействие. В настоящее время не существует универсальной модели поверхностного натяжения жидкостей, которая позволила бы количественно объяснить экспериментальные результаты [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В природе и технике чрезвычайно распространены разнообразные поверхностные явления. Их изучение важно для более глубокого понимания различных физико-химических

процессов и решения многих научных и инженерных задач в области физики, биологии, медицины, химии, а также при исследовании атмосферных явлений [1]. В связи с этим актуальным направлением является изучение поверхностных свойств воды и водных растворов солей. Результаты данного исследования имеют как фундаментальное, так и прикладное значение. Полученные в работе данные по поверхностному натяжению водного раствора хлорида натрия в широком интервале концентрации при различных температурах могут служить справочным материалом при проведении различных технологических расчетов, а также в ходе анализа процессов разделения и очистки жидких смесей [5]. Кроме этого, водные растворы хлорида натрия являются основными объектами при экспериментальных исследованиях структуры и термодинамических свойств водных растворов электролитов [3].

Список источников

1. Чулкова Е. В., Емельяненко А. М., Емельяненко К. А. и др. Параметры переохлажденных капель воды и водных растворов хлоридов щелочных металлов в интервале от 25 до $-19 \text{ }^\circ\text{C}$ // Журнал физической химии. 2020. Т. 94, № 3. С. 436–442.
2. Русанов А. И., Прохоров В. А. Межфазная тензометрия. СПб.: Химия, 1994. 397 с.
3. Федорова А. А., Улитин М. В. Поверхностное натяжение и адсорбция электролитов на границе раздела фаз водный раствор – газ // Журнал физической химии. 2007. Т. 81, № 7. С. 1278–1281.
4. Хайдаров Г. Г., Хайдаров А. Г., Машек А. Ч. и др. Влияние температуры на поверхностное натяжение // Вестник Санкт-Петербургского университета. Физика и Химия. 2012. № 1. С. 24–28.
5. Варгафтик Н. В. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
6. Ролдугин В. И. Физикохимия поверхности. 2-е изд., испр. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 565 с.
7. Vonnegut B. Rotating bubble method for the determination of surface and interfacial tensions. *Review of Scientific Instruments*. 1942;13(1):6–9.
8. Трумбетова З. М., Заводовский А. Г. Исследование коэффициента поверхностного натяжения на границе нефть – раствор АСП для различных ПАВ // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2016. № 5. С. 86–90. DOI 10.31660/0445-0108-2016-5-86-90.
9. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др. Физические величины: справочник / под ред.

References

1. Chulkova E. V., Emelyanenko A. M., Emelyanenko K. A. et al. Parameters of supercooled droplets of water and aqueous solutions of chlorides of alkali metals in the temperature range of $+25$ to $-19 \text{ }^\circ\text{C}$. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 2020;94(3):436–442. (In Russian).
2. Rusanov A. I., Prokhorov V. A. Mezhfaznaya tenzometriya. St. Petersburg: Khimiia; 1994. 397 p. (In Russian).
3. Fedorova A. A., Ulitin M. V. Surface tension and adsorption of electrolytes at the aqueous solution–gas interface. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 2007;81(7):1278–1281. (In Russian).
4. Khaidarov G. G., Khaidarov A. G., Mashek A. Ch. et al. Temperature influence on surface tension. *Vestnik SPbSU. Physics and Chemistry*. 2012;(1):24–28. (In Russian).
5. Vargaftik N. V. Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i zhidkosti. Moscow: Nauka; 1972. 720 p. (In Russian).
6. Roldugin V. I. Fizikokhimiya poverkhnosti. 2nd ed., rev. ed. Dolgoprudny: Intellekt; 2011. 565 p. (In Russian).
7. Vonnegut B. Rotating bubble method for the determination of surface and interfacial tensions. *Review of Scientific Instruments*. 1942;13(1):6–9.
8. Trumbetova Z. M., Zavodovskiy A. G. Study of the surface tension factor at the boundary oil – ASP solution for various surfactants. *Oil and Gas Studies*. 2016;(5):86–90. DOI 10.31660/0445-0108-2016-5-86-90. (In Russian).
9. Babichev A. P., Babushkina N. A., Bratkovsky A. M. et al. Fizicheskie velichiny. Reference book. Grigorye-

- И. С. Григорьева, Е. З. Мейликова. М. : Энергоатомиздат, 1991. 1231 с.
10. Масимов Э. А., Эйвазов Э. А., Ибрагимли А. Б. и др. Анализ температурной зависимости поверхностного натяжения жидкостей // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12–4. С. 622–624.
10. Masimov E. A., Eivazov E. A., Ibragimli A. B. et al. Analysis of temperature depends on the liquid surface tension. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*. 2015;(12–4):622–624. (In Russian).

Информация об авторе

А. Г. Заводовский – кандидат физико-математических наук, доцент.

Information about the author

A. G. Zavodovsky – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

Научная статья
УДК 519.862.6
DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-11

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕСТОВ ГЕТЕРОСКЕДАСТИЧНОСТИ

Артем Дмитриевич Черемухин

*Нижегородский государственный инженерно-экономический университет,
Княгинино, Россия*

ngie.u.cheremuhin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4076-5916>

Аннотация. В данной статье рассматривается эффективность различных статистических тестов, предназначенных для обнаружения гетероскедастичности в модели. Описывается методология исследования, принцип построения синтетических данных с разными типами гетероскедастичности. Приведены детальные результаты анализа, определены лучшие тесты для решения задач детектирования гомо- и гетероскедастичности. Применен аппарат деревьев классификации для определения лучших тестов в зависимости от свойств выборки, показано наличие данных закономерностей. Отмечено, что в практических работах необходимо проведение дополнительных исследований, направленных на установление лучшего статистического теста при наблюдаемых свойствах данных. Кроме того, сделан вывод о том, что для рассматриваемых типов гетероскедастичности все выбранные тесты показывают значительный процент ошибок, что говорит о необходимости продолжения соответствующих теоретических исследований и разработке новых способов детектирования разных форм гетероскедастичности.

Ключевые слова: регрессия, линейная модель, гетероскедастичность, типы гетероскедастичности, статистический тест, ошибка первого рода, ошибка второго рода

Для цитирования: Черемухин А. Д. Оценка эффективности тестов гетероскедастичности // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 1. С. 81–88. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-11.

Original article

EVALUATING EFFECTIVENESS OF TESTS FOR HETEROSCEDASTICITY

Artem D. Cheremukhin

Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Russia

ngie.u.cheremuhin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4076-5916>

Abstract. The article studies the effectiveness of various statistical tests for heteroscedasticity in a model. A research design and a principle for building synthetic data with various types of heteroscedasticity are described. The findings of an analysis are given. The most effective tests for detecting homo- and heteroscedasticity are determined. A classification trees mechanism is applied to identify the most effective tests according to the sampling properties, and such pattern is demonstrated. In applied studies, there is a need to carry out further research aimed at detecting the most suitable statistical test based on the given data properties. In addition, it is concluded that each considered test fails for different types of heteroscedasticity. Thus, it is necessary to conduct further theoretical studies in the field as well as design new approaches for detecting various types of heteroscedasticity.

Keywords: regression, linear model, heteroscedasticity, types of heteroscedasticity, statistical test, type 1 error, type 2 error

For citation: Cheremukhin A. D. Evaluating effectiveness of tests for heteroscedasticity. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(1):81–88. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-11.

ВВЕДЕНИЕ

Активное использование методов анализа данных для решения большого комплекса практических задач актуализировало и вопрос о границах применимости тех или иных методов. Например, для случая классической регрессии общеизвестно, что метод наименьших квадратов дает несмещенные и эффективные оценки коэффициентов только при выполнении условий Гаусса – Маркова. В противном случае возможно получение смещенных оценок коэффициентов, что может привести к серьезным ошибкам при внедрении модели на практике.

Среди всех условий Гаусса – Маркова самым сложно проверяемым является условие на гомоскедастичность – условие на отсутствие зависимости между дисперсией ошибки модели и значениями независимой переменной. Однако в последнее время в разных программных пакетах (например, в пакете *skedastic* для языка R) появилось значительное количество реализаций разных статистических тестов, проверяющих гипотезу о гомоскедастичности остатков.

Большое количество теоретических подходов к исследованию понятия гомоскедастичности привело к появлению значительного числа тестов, проверяющих разные типы зависимостей между ошибками модели и величиной независимой переменной, – а это значит, что некоторые тесты гомоскедастичности эффективны при одних входных данных, а другие – при других.

Наличием большого числа тестов можно объяснить и частое игнорирование исследователями в разных сферах науки [1, 2] процедуры оценки выполнимости Гаусса – Маркова.

Целью данной работы является обнаружение с помощью вычислительного эксперимента самых эффективных статистических тестов для разных случаев гетероскедастичности.

К вопросу оценки эффективности тестов гетероскедастичности исследователи периодически возвращаются – можно выделить работы [3–7]. В отличие от последней ра-

боты [7] в этой сфере, данное исследование сосредоточено на моделях гетероскедастичности, в которых значение ошибок зависит от значений независимой переменной; кроме того, исследуется не только эффективность тестов в плане определения гетероскедастичности, но и их эффективность в плане определения гомоскедастичности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Все расчеты, проведенные в ходе данного исследования, были выполнены с помощью языка R. В качестве объектов изучения были взяты статистические тесты, реализованные в пакете *skedastic*: Анкомба [8], BAMSET-тест (модификация *M*-теста Бартлетта, выполненная Рамсеем [9]), Бикеля [10], Бройша – Погана [11], Кука – Вейзеберга [12], Эванса – Кинга [13], Голдфильда – Квандта [14], Харрисона – Маккэйба [15], Хорна [16], Симонова – Цая [17], Вербыла [18], Уайта [19], Уилкокса – Келемана [20], Юсе [21], Чжоу [22].

Общая концепция оценки эффективности тестов основана на создании синтетических данных, по части которых мы точно знаем, что гетероскедастичности там нет, а по части – точно знаем, что она есть. Указанные выше тесты, однако, различаются по характеру рассматриваемой зависимости между ошибками и значениями независимой переменной. Поэтому для обобщенной оценки эффективности тестов использовались данные, сгенерированные по различным моделям:

– модель линейной зависимости с остатками, подчиненными нормальному закону распределения;

– модель линейной зависимости с нормально распределенными остатками, значение которых гиперболически зависит от значений независимой переменной:

$$y = a \cdot x + b + \varepsilon \cdot \frac{1}{(1+0.1|x|)^2}; \quad (1)$$

– модель линейной зависимости с нормально распределенными остатками, значение которых уменьшается при уменьшении значений независимой переменной:

$$y = a \cdot x + b + \varepsilon \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{x}{\max(x)}\right); \quad (2)$$

– модель линейной зависимости с нормально распределенными остатками, значения которых уменьшается при возрастании значений независимой переменной:

$$y = a \cdot x + b + \varepsilon \cdot \frac{1}{(1+0.025 \cdot |x - \min(x)|)^2}; \quad (3)$$

– модель линейной зависимости с нормально распределенными остатками, значения которых увеличивается при возрастании значений независимой переменной:

$$y = a \cdot x + b + \varepsilon \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{x - \min(x)}{\max(x)}\right); \quad (4)$$

– модель линейной зависимости с нормально распределенными остатками, знак которых различен для разных частей выборки:

$$y = a \cdot x + b + |\varepsilon| \cdot \begin{cases} 1 & \text{для одной части выборки} \\ -1 & \text{для второй части выборки.} \end{cases} \quad (5)$$

Графическое изображение всех шести типов синтетических данных, на которых оценивается эффективность тестов, представлено на рисунке.

Общий алгоритм генерации одного экземпляра синтетических данных для исследования состоит из следующих шагов:

– определяется размер выборки (случайно выбирается число из интервала [1,5;3], которое потенцируется по основанию 10 и округляется – количество элементов в выборке, таким образом, может быть от 30 до 1 000);

– генерируются значения независимой переменной (из нормального распределения, среднее значение которого находится в диапазоне от 0,1 до 1 000, а стандартное отклонение меняется от 1 до 5);

– генерируется параметр a линейной зависимости (случайно выбирается число из интервала [1,5;3], которое потенцируется по основанию 2 и округляется до сотых);

– генерируется параметр b линейной зависимости (выбирается случайно из интервала, образованного максимальным и минимальным значением независимой переменной);

– рассчитывается величина зависимой переменной без учета остатков, и на основе ее дисперсии генерируется вектор ошибок (ошибки распределены нормально, их среднее равно 0, среднее квадратическое отклонение выбирается из диапазона от среднее квадратического отклонения зависимой переменной до удвоенного значения среднее квадратического отклонения);

– рассчитывается доля значений для модели b , которая определяет процент ошибок, взятых с положительным знаком;

– рассчитываются шесть векторов значений зависимой переменной для разных моделей гетероскедастичности.

Данный цикл был повторен 10 000 раз – в результате было получено 1 000 датафреймов разного размера, с разными параметра-

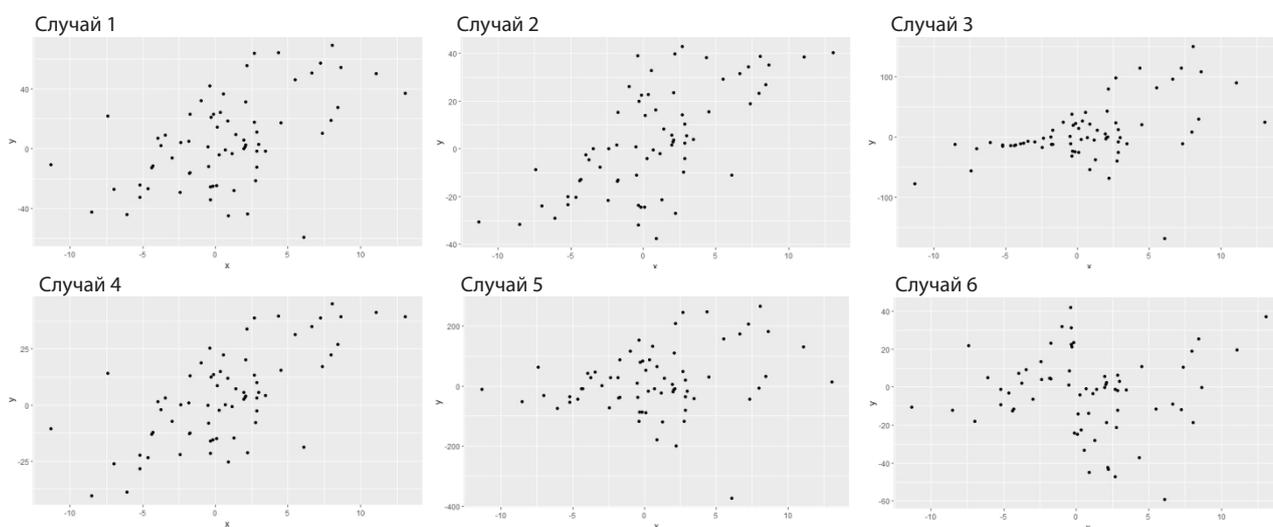


Рисунок. Графическое отображение используемых шести типов синтетических данных
Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

ми независимой переменной, распределения ошибок и линейной зависимости.

После этого всеми вышеперечисленными статистическими тестами на уровне значимости в 0,05 были исследованы сгенерированные датафреймы. Полученные результаты исследовались двумя способами:

- путем построения сравнительных таблиц по тестам;
- через использование деревьев решений для выявления оптимального теста в зависимости от параметров выборок.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительная оценка эффективности тестов представлена ниже (таблица).

Согласно данным таблицы, можно сделать следующие выводы:

- тесты Юсе и Уилкокса – Келемана на представленных данных показали 100-процентную точность на данных без гетероскедастичности. Соответствующие тесты показывают крайне низкую вероятность ошибок первого рода, т. е. ошибочного отклонения гипотезы о гомоскедастичности;
- для случая гетероскедастичности при гиперболической зависимости остатков от значений независимой переменной (модель 2) все тесты, кроме BAMSET-теста, показывают более 50% ошибок. Большая

вероятность ошибок второго рода говорит об отсутствии надежных способов идентификации данного типа гетероскедастичности;

- для случая гетероскедастичности с уменьшением значений ошибок при уменьшении значений независимой переменной (модели 3 и 4) констатируем, что наилучший результат показывает тест Эванса – Кинга – примерно в 85–88% случаев он позволил верно отвергнуть нулевую гипотезу о гомоскедастичности;

– для случая гетероскедастичности с увеличением значения ошибок при возрастании значений независимой переменной (модель 5) лучшие результаты показывают BAMSET-тест и тест Эванса – Кинга – в среднем в 1 случае из 12 они не позволяют отвергнуть ошибочную гипотезу о гомоскедастичности;

– для случая гетероскедастичности с изменением знака (модель 6) все тесты, кроме BAMSET-теста, показывают более 50% ошибок. Большая вероятность ошибок второго рода говорит об отсутствии надежных способов идентификации данного типа гетероскедастичности.

Общий вывод позволяет констатировать большую эффективность BAMSET-теста и теста Эванса – Кинга в части сравнительно низкой вероятности ошибки второго рода

Таблица

Процент ошибок статистических тестов для разных моделей гетероскедастичности

Тест	Номер модели					
	1	2	3	4	5	6
Анкомба	4,62	83,71	37,12	16,20	32,50	100,00
BAMSET	0,19	43,93	32,43	20,93	16,19	39,47
Бикеля	4,67	99,93	95,30	95,37	95,33	67,47
Бройша – Погана	4,62	83,71	32,53	16,16	32,46	100,00
Кука – Вейзеберга	0,02	83,63	27,91	20,76	20,91	99,99
Эванса – Кинга	39,41	62,77	16,32	11,56	16,28	76,85
Голдфильда – Квандта	0,04	78,89	32,49	16,33	20,87	83,84
Харрисона – Маккэйба	11,58	67,40	32,56	20,91	32,52	99,89
Хорна	4,7	79,01	32,49	16,32	32,46	99,99
Симонова – Цая	0,02	83,63	27,91	20,76	20,91	99,99
Вербыла	0,02	83,63	27,91	20,76	20,90	99,99
Уайта	0,14	71,83	32,50	20,76	48,65	99,99
Уилкокса – Келемана	0	95,25	48,70	16,39	37,09	99,96
Юсе	0	60,35	53,36	72,07	99,99	99,88
Чжоу	11,68	99,98	27,91	83,60	55,95	-

Примечание: составлено по результатам расчетов автора.

и тестов Юсе, Уилкокса – Келемана в части низкой вероятности ошибки первого рода.

Однако сделанные выводы являются общими – возможно, при некоторых особенностях выборки некоторые статистические тесты обладают существенно большей эффективностью, чем другие. Для диагностики этого нами был использован метод деревьев классификации. Его применение к смоделированным данным позволило сделать следующие выводы:

– для случая с отсутствием гетероскедастичности все 15 рассмотренных тестов верно принимают нулевую гипотезу при следующих условиях: коэффициент корреляции между зависимой и независимой переменной меньше 0,747, стандартное отклонение независимой переменной больше 17,48;

– для случая гетероскедастичности при гиперболической зависимости остатков от значений независимой переменной (модель 2) 9 из 15 тестов верно отвергают нулевую гипотезу при следующих условиях: истинный коэффициент наклона в линейной модели находится в диапазоне от 0,36 до 6,42, а соотношение коэффициента наклона к стандартному отклонению независимой переменной меньше 0,636;

– для случая гетероскедастичности с уменьшением значений ошибок при уменьшении значений независимой переменной (модель 3) 13 из 15 тестов верно отвергают нулевую гипотезу при небольших значениях независимой переменной (среднее значение независимой переменной меньше 4,73);

– для случая гетероскедастичности с уменьшением значений ошибок при уменьшении значений независимой переменной (модель 4) 14 из 15 тестов верно отвергают нулевую гипотезу при выполнении следующих условий: стандартное отклонение зависимой переменной меньше 22,1, истинный коэффициент наклона в линейной модели меньше 0,847, коэффициент корреляции между зависимой и независимой переменной больше 0,95;

– для случая гетероскедастичности с увеличением значения ошибок при возрастании

значений независимой переменной (модель 5) 12 из 15 тестов верно отвергают нулевую гипотезу при коэффициенте корреляции между зависимой и независимой переменной вне диапазона (0,38;0,52);

– для случая гетероскедастичности с изменением знака ошибок (модель 6) 5 тестов из 15 верно отвергают нулевую гипотезу при среднем значении зависимой переменной от 637 до 715.

Далее был проведен более детальный анализ по областям эффективности тестов. Для случая с отсутствием гетероскедастичности можно сделать следующие выводы:

– если среднее значение независимой переменной меньше 87,37, то в 99,7% случаев лучшим является тест Бикеля;

– если среднее значение независимой переменной больше 87,37, соотношение коэффициента наклона к стандартному отклонению независимой переменной меньше 0,74, среднее значение независимой переменной меньше 906, то в 99,5% случаев лучшим является тест Голдфелда – Квандта;

– если среднее значение независимой переменной больше 87,37, соотношение коэффициента наклона к стандартному отклонению независимой переменной меньше 0,74, среднее значение независимой переменной больше 906, то в 98,2% случаев лучшим является тест Бикеля;

– если среднее значение независимой переменной больше 87,37, соотношение коэффициента наклона к стандартному отклонению независимой переменной больше 0,74, то в 99,9% случаев лучшим является тест Уайта.

Для случаев гетероскедастичности при гиперболической зависимости остатков от значений независимой переменной (модель 2) можно сделать следующие выводы:

– если среднее квадратичное отклонение зависимой переменной меньше 39,6, то в 99,3% случаев лучшим является тест Эванса – Кинга;

– если среднее квадратичное отклонение зависимой переменной больше 39,6, сред-

нее значение зависимой переменной меньше 33,42, то в 99,9% случаев лучшим является BAMSET-тест.

Для случаев гетероскедастичности с уменьшением значений ошибок при уменьшении значений независимой переменной (модель 3) можно сделать следующие выводы:

– если среднее значение независимой переменной меньше 87,37, соотношение коэффициента наклона к стандартному отклонению независимой переменной меньше 6,24, то в 99,9% случаев лучшим является тест Чжоу;

– если среднее значение независимой переменной больше 87,37, а среднее значение зависимой переменной больше 764,2, то в 99,4% случаев лучшим является тест Эванса – Кинга;

– если среднее значение независимой переменной больше 87,37, среднее значение зависимой переменной меньше 764,2, стандартное отклонение зависимой переменной меньше 188,7, то лучшим является тест Бикеля;

– если среднее значение независимой переменной больше 87,37, среднее значение зависимой переменной меньше 764,2, стандартное отклонение зависимой переменной больше 188,7, то лучшим является тест Харрисона – Маккейба.

Для случаев гетероскедастичности с уменьшением значений ошибок при уменьшении значений независимой переменной (модель 4) можно сделать следующие выводы:

– если коэффициент корреляции между зависимой и независимой переменной больше 0,956, то лучшим является тест Чжоу;

– если коэффициент корреляции между зависимой и независимой переменной меньше 0,956, стандартное отклонение зависимой переменной меньше 16,46, то в 99,9% случаев лучшим является BAMSET-тест;

– если коэффициент корреляции между зависимой и независимой переменной меньше 0,956, стандартное отклонение зависимой переменной больше 16,46, то в 99,7% случаев лучшим является тест Эванса – Кинга.

Для случаев гетероскедастичности с увеличением значения ошибок при возрастании

значений независимой переменной (модель 5) можно сделать следующие выводы:

– если коэффициент наклона в модели меньше 5,13, а коэффициент корреляции между зависимой и независимой переменной меньше 0,73, то в 99,6% лучшим является тест Харрисона – Маккейба;

– если коэффициент наклона в модели меньше 5,13, а коэффициент корреляции между зависимой и независимой переменной больше 0,73, то в 99,6% лучшим является тест Эванса – Кинга;

– если коэффициент наклона в модели больше 5,13, соотношение коэффициента наклона к стандартному отклонению независимой переменной меньше 0,36, то лучшим является тест Голдфильда – Квандта;

– если коэффициент наклона в модели больше 5,13, соотношение коэффициента наклона к стандартному отклонению независимой переменной больше 0,36, стандартное отклонение зависимой переменной меньше 37,2, то в 99,8% случаев лучшим является тест Бикеля;

– если коэффициент наклона в модели больше 5,13, соотношение коэффициента наклона к стандартному отклонению независимой переменной больше 0,36, стандартное отклонение зависимой переменной больше 37,2, то в 99,5% случаев лучшим является тест Чжоу.

Для случаев гетероскедастичности с изменением знака ошибок (модель 6) можно сделать следующие выводы:

– если среднее значение независимой переменной больше 87,4, то в 99,9% случаев лучшим является тест Бикеля;

– если среднее значение независимой переменной меньше 87,4, коэффициент наклона в модели меньше трех, то лучшим является тест Юсе;

– если среднее значение независимой переменной меньше 87,4, коэффициент наклона в модели больше трех, стандартное отклонение независимой переменной меньше 24,2, то в 99,6% случаев лучшим является BAMSET-тест;

– если среднее значение независимой переменной меньше 87,4, коэффициент наклона в модели больше трех, стандартное отклонение независимой переменной больше 24,2, то в 99,6% случаев лучшим является тест Эванса – Кинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов позволил сделать несколько теоретических и прикладных выводов.

Во-первых, в прикладных задачах, в зависимости от особенностей их постановки, в общем случае лучше использовать тесты Юсе и Уилкокса – Келемана или тест Эванса – Кинга вместе с BAMSET-тестом.

Во-вторых, показано наличие существенной зависимости эффективности рассмотренных статистических тестов от параметров выборки, к которой они применяются. Соответственно, в практических исследованиях рекомендуется сначала проведение вспомогательных работ, направленных на установление эффективности тестов гетероскедастичности при имеющихся данных с конкретными свойствами.

В-третьих, при некоторых типах гетероскедастичности все рассмотренные тесты показывают значительный процент ошибок. Это говорит о необходимости продолжения соответствующих теоретических исследований и разработке новых способов детектирования разных форм гетероскедастичности.

Список источников

1. Асансеитова С. М., Ковалева Э. В., Свинухов В. Г. Оценка влияния экспорта и прямых иностранных инвестиций на ВВП на примере стран-членов ЕАЭС // Вестник НГИЭИ. 2018. № 9. С. 60–70.
2. Молодченков Д. А. Результаты экспериментальных исследований профилообразующего катка для гребневого посева пропашных культур // Вестник НГИЭИ. 2018. № 9. С. 114–127.
3. Lyon J. D., Tsai C.-L. A comparison of tests for heteroscedasticity. *The Statistician*. 1996;45(3):337–349.
4. Harvey A. C., Phillips G. D. A. A comparison of the power of some tests for heteroskedasticity in the general linear model. *Journal of Econometrics*. 1974;2:307–316.
5. Griffiths W. E., Surekha K. A Monte Carlo evaluation of the power of some tests for heteroscedasticity. *Journal of Econometrics*. 1986;31(2):219–231.
6. Dufour J.-M., Khalaf L., Bernard J.-T. et al. Simulation-based finite-sample tests for heteroskedasticity and ARCH effects. *Journal of Econometrics*. 2004;122(2):317–347.
7. Uyanto S. S. Monte Carlo power comparison of seven most commonly used heteroscedasticity tests. *Communications in Statistics – Simulation and Computation*. 2019;51(4):2065–2082.
8. Bickel P. J. Using residuals robustly I: Tests for heteroscedasticity, nonlinearity. *Ann Statist*. 1978;6(2):266–291.
9. Ramsey J. B. Tests for specification errors in classical linear least-squares regression analysis. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Statistical Methodology)*. 1968;31(2):350–371.
10. Carroll R. J., Ruppert D. On robust tests for heteroscedasticity. *Ann Statist*. 1981;9(1):206–210.
11. Breusch T. S., Pagan A. R. A simple test for heteroscedasticity and random coefficient variation. *Econometrica*. 1979;47(5):1287–1294.

References

1. Asanseitova S. M., Kovaleva E. V., Svinukhov V. G. Assessment of the impact of exports and foreign direct investment on GDP based on the example of the EAEU member countries. *Bulletin NGIEI*. 2018;(9):60–70. (In Russian).
2. Molodchenkov D. A. The results of experimental researches of a profilebase rink for rowing of tilled crops. *Bulletin NGIEI*. 2018;(9):114–127. (In Russian).
3. Lyon J. D., Tsai C.-L. A comparison of tests for heteroscedasticity. *The Statistician*. 1996;45(3):337–349.
4. Harvey A. C., Phillips G. D. A. A comparison of the power of some tests for heteroskedasticity in the general linear model. *Journal of Econometrics*. 1974;2:307–316.
5. Griffiths W. E., Surekha K. A Monte Carlo evaluation of the power of some tests for heteroscedasticity. *Journal of Econometrics*. 1986;31(2):219–231.
6. Dufour J.-M., Khalaf L., Bernard J.-T. et al. Simulation-based finite-sample tests for heteroskedasticity and ARCH effects. *Journal of Econometrics*. 2004;122(2):317–347.
7. Uyanto S. S. Monte Carlo power comparison of seven most commonly used heteroscedasticity tests. *Communications in Statistics – Simulation and Computation*. 2019;51(4):2065–2082.
8. Bickel P. J. Using residuals robustly I: Tests for heteroscedasticity, nonlinearity. *Ann Statist*. 1978;6(2):266–291.
9. Ramsey J. B. Tests for specification errors in classical linear least-squares regression analysis. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Statistical Methodology)*. 1968;31(2):350–371.
10. Carroll R. J., Ruppert D. On robust tests for heteroscedasticity. *Ann Statist*. 1981;9(1):206–210.
11. Breusch T. S., Pagan A. R. A simple test for heteroscedasticity and random coefficient variation. *Econometrica*. 1979;47(5):1287–1294.

12. Cook R. D., Weisberg S. Diagnostics for heteroscedasticity in regression. *Biometrika*. 1983;70(1):1–10.
 13. Evans M. A., King M. A point optimal test for heteroscedastic disturbances. *Journal of Econometrics*. 1985;27(2):163–178.
 14. Goldfeld S. M., Quandt R. E. Some tests for homoscedasticity. *Journal of the American Statistical Association*. 1965;60(310):539–547.
 15. Harrison M. J., McCabe B. P. M. A test for heteroscedasticity based on ordinary least squares residuals. *Journal of the American Statistical Association*. 1979;74(366a):494–499.
 16. Horn P. Heteroscedasticity of residuals: A non-parametric alternative to the Goldfeld–Quandt peak test. *Communications in Statistics – Theory and Methods*. 1981;10(8):795–808.
 17. Simonoff J. S., Tsai C.-L. Use of modified profile likelihood for improved tests of constancy of variance in regression. *Appl Statist*. 1994;43(2):357–370.
 18. Verbyla A. P. Modelling variance heterogeneity: Residual maximum likelihood and diagnostics. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*. 1993;55(2):493–508.
 19. White H. A heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity. *Econometrica*. 1980;48(4):817–838.
 20. Wilcox R. R., Keselman H. J. Detecting heteroscedasticity in a simple regression model via quantile regression slopes. *Journal of Statistical Computation and Simulation*. 2006;76(8):705–712.
 21. Yuce M. An asymptotic test for the detection of heteroscedasticity. *Istanbul University Econometrics and Statistics e-Journal*. 2008;8:33–44.
 22. Zhou Q. M., Song P. X.-K., Thompson M. E. Profiling heteroscedasticity in linear regression models. *Canadian Journal of Statistics*. 2015;43(3):358–377.
12. Cook R. D., Weisberg S. Diagnostics for heteroscedasticity in regression. *Biometrika*. 1983;70(1):1–10.
 13. Evans M. A., King M. A point optimal test for heteroscedastic disturbances. *Journal of Econometrics*. 1985;27(2):163–178.
 14. Goldfeld S. M., Quandt R. E. Some tests for homoscedasticity. *Journal of the American Statistical Association*. 1965;60(310):539–547.
 15. Harrison M. J., McCabe B. P. M. A test for heteroscedasticity based on ordinary least squares residuals. *Journal of the American Statistical Association*. 1979;74(366a):494–499.
 16. Horn P. Heteroscedasticity of residuals: A non-parametric alternative to the Goldfeld–Quandt peak test. *Communications in Statistics – Theory and Methods*. 1981;10(8):795–808.
 17. Simonoff J. S., Tsai C.-L. Use of modified profile likelihood for improved tests of constancy of variance in regression. *Appl Statist*. 1994;43(2):357–370.
 18. Verbyla A. P. Modelling variance heterogeneity: Residual maximum likelihood and diagnostics. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*. 1993;55(2):493–508.
 19. White H. A heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity. *Econometrica*. 1980;48(4):817–838.
 20. Wilcox R. R., Keselman H. J. Detecting heteroscedasticity in a simple regression model via quantile regression slopes. *Journal of Statistical Computation and Simulation*. 2006;76(8):705–712.
 21. Yuce M. An asymptotic test for the detection of heteroscedasticity. *Istanbul University Econometrics and Statistics e-Journal*. 2008;8:33–44.
 22. Zhou Q. M., Song P. X.-K., Thompson M. E. Profiling heteroscedasticity in linear regression models. *Canadian Journal of Statistics*. 2015;43(3):358–377.

Информация об авторе

А. Д. Черемухин – кандидат экономических наук, доцент.

Information about the author

A. D. Cheremukhin – Candidate of Sciences (Economics), Docent.

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются на официальном сайте издания <https://www.vestcyber.ru> и в базе данных Научной электронной библиотеки на сайте elibrary.ru, сведения о публикуемых материалах включаются в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Адрес учредителя и издателя:
бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»,
628412, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Сургут, пр. Ленина, 1. Тел. +7 (3462) 76-29-29

Дата опубликования 29.03.2024. Формат 60 × 84/8
Уч.-изд. л. 6,1. Цена свободная