

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 26

2020

№ 9

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

САПР

КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА

МЕТОДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

ОПЕРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДЫ

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

НЕЙРОСЕТИ И
НЕЙРОКОМПЬЮТЕРЫ

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ОПТИМИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

ИТ В ОБРАЗОВАНИИ

ГИС

Рисунки к статье М. А. Нечухаева, В. В. Чепкасова, Н. О. Вахрушевой
**«СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ БИЗНЕС-ПРОЦЕССА ОБСЛУЖИВАНИЯ СКВАЖИН
 С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»**



Рис. 1. Распределение операционных затрат в процессе эксплуатации месторождения



Рис. 2. Процесс обслуживания скважин



Рис. 3. Оптимизация процесса обслуживания скважин

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 26
2020
№ 9

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

DOI 10.17587/issn.1684-6400

УЧРЕДИТЕЛЬ

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

- Львович И. Я., Львович Я. Е., Преображенский А. П., Чопоров О. Н. Особенности методов машинного обучения 499

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

- Щербань О. Г., Щербань И. В., Лобзенко П. В. Метод поиска высокочастотных паттернов в составе зашумленных многомерных сигналов в реальном времени 507

БАЗЫ ДАННЫХ

- Яхно Н. Н., Гридин В. Н., Смирнов Д. С., Панищев В. С., Парфенов В. А., Остроумова Т. М., Коберская Н. Н. Статистическая обработка и методика сокращения размерности пространства данных пациентов при анализе когнитивных нарушений 515
- Круглик А. С., Лакман И. А. Гибридный подход усиленной контентом коллаборативной фильтрации в области рекомендательных систем 523

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ

- Авдошин С. М., Чернов А. В., Песоцкая Е. Ю. Сервис цифрового контента для удаленного обучения 529

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Дымченко И. В., Кузнецов С. А., Сырых О. А., Яновская В. С. Применение технологии виртуальной реальности и 3D-моделирования для цифровых реконструкций объектов культурного наследия 538
- Нечухаев М. А., Чепкасов В. В., Вахрушева Н. О. Совершенствование бизнес-процесса обслуживания скважин с помощью цифровых технологий . . . 548

Главный редактор:

СТЕМПКОВСКИЙ А. Л.,
акад. РАН, д. т. н., проф.

Зам. главного редактора:

ИВАННИКОВ А. Д., д. т. н., проф.
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с.н.с.

Редакционный совет:

БЫЧКОВ И. В., акад. РАН, д. т. н.
ЖУРАВЛЕВ Ю. И.,
акад. РАН, д. ф.-м. н., проф.
КУЛЕШОВ А. П.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
ПОПКОВ Ю. С.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
РУСАКОВ С. Г.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
РЯБОВ Г. Г.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
СОЙФЕР В. А.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
СОКОЛОВ И. А.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
СУЕТИН Н. В., д. ф.-м. н., проф.
ЧАПЛЫГИН Ю. А.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
ШАХНОВ В. А.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
ШОКИН Ю. И.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
ЮСУПОВ Р. М.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

Редакционная коллегия:

АВДОШИН С. М., к. т. н., доц.
АНТОНОВ Б. И.
БАРСКИЙ А. Б., д. т. н., проф.
ВАСЕНИН В. А., д. ф.-м. н., проф.
ВАСИЛЬЕВ В. И., д. т. н., проф.
ВИШНЕКОВ А. В., д. т. н., проф.
ДИМИТРИЕНКО Ю. И., д. ф.-м. н., проф.
ДОМРАЧЕВ В. Г., д. т. н., проф.
ЗАБОРОВСКИЙ В. С., д. т. н., проф.
ЗАРУБИН В. С., д. т. н., проф.
КАРПЕНКО А. П., д. ф.-м. н., проф.
КОЛИН К. К., д. т. н., проф.
КУЛАГИН В. П., д. т. н., проф.
КУРЕЙЧИК В. В., д. т. н., проф.
ЛВОВИЧ Я. Е., д. т. н., проф.
МАРТЫНОВ В. В., д. т. н., проф.
МИХАЙЛОВ Б. М., д. т. н., проф.
НЕЧАЕВ В. В., к. т. н., проф.
ПОЛЕЩУК О. М., д. т. н., проф.
ПРОХОРОВ С. А., д. т. н., проф.
САКСОНОВ Е. А., д. т. н., проф.
СОКОЛОВ Б. В., д. т. н., проф.
ТИМОНИНА Е. Е., д. т. н., проф.
УСКОВ В. Л., к. т. н. (США)
ФОМИЧЕВ В. А., д. т. н., проф.
ШИЛОВ В. В., к. т. н., доц.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу <http://novtex.ru/IT>.
Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования и базу данных RSCI на платформе Web of Science.
Журнал входит в Перечень научных журналов, в которых по рекомендации ВАК РФ должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

INFORMATION TECHNOLOGIES INFORMACIONNYYE TEHNOLOGII

Vol. 26
2020
No. 9

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since November 1995

DOI 10.17587/issn.1684-6400

ISSN 1684-6400

CONTENTS

MODELING AND OPTIMIZATION

- Lvovich I. Ya., Lvovich Ya. E., Preobrazhensky A. P., Choporov O. N.** The Features of Machine Learning Methods 499

DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS

- Shcherban O. G., Shcherban I. V., Lobzenko P. V.** The Real-Time Method for the Temporal Localization of the High-Frequency Patterns in Noised Multichannel Signals 507

DATABASE

- Yakhno N. N., Gridin V. N., Smirnof D. S., Panishchev V. S., Parfenov V. A., Ostroumova T. M., Koberskaya N. N.** Statistical Processing and Methods for Reducing the Dimension of Space on the Example of Data for Patients in the Analysis of Cognitive Impairment 515
- Kruglik A. S., Lackman I. A.** Hybrid Approach Content-Boosted Collaborative Filtering in the Field of Recommendation Systems 523

INFORMATION TECHNOLOGIES IN EDUCATION

- Avdoshin S. M., Chernov A. V., Pesotskaya E. Yu.** Digital Content Service for the Distance Learning 529

APPLICATION INFORMATION SYSTEMS

- Dymchenko I. V., Kuznetsov S. A., Syrykh O. A., Yanovskaya V. S.** Virtual Reality and 3D Modeling Technologies for Digital Reconstruction of Cultural Heritage Objects 538
- Nechukhaev M. A., Chepkasov V. V., Vakhrusheva N. O.** Improving of Business Process of Servicing Wells using Digital Technology 548

Editor-in-Chief:

Stempkovsky A. L., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Deputy Editor-in-Chief:

Ivannikov A. D., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Filimonov N. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Chairman:

Bychkov I. V., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zhuravljov Yu. I., Member of RAS,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Kuleshov A. P., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Popkov Yu. S., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Rusakov S. G., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Ryabov G. G., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Soifer V. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Sokolov I. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Suetin N. V.,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Chaplygin Yu. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shakhnov V. A., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shokin Yu. I., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Yusupov R. M., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Editorial Board Members:

Avdoshin S. M., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.
Antonov B. I.
Barsky A. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Vasenin V. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Vasiliev V. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Vishnekov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Dimitrienko Yu. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Domrachev V. G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zaborovsky V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zarubin V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Karpenko A. P., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Kolin K. K., Dr. Sci. (Tech.)
Kulagin V. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kureichik V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Ljvovich Ya. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Martynov V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Mikhailov B. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Nechaev V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.
Poleschuk O. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Prokhorov S. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Saksonov E. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Sokolov B. V., Dr. Sci. (Tech.)
Timonina E. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Uskov V. L. (USA), Dr. Sci. (Tech.)
Fomichev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shilov V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.

Editors:

Bezmenova M. Yu.

Complete Internet version of the journal at site: <http://novtex.ru/IT>.

According to the decision of the Higher Certifying Commission of the Ministry of Education of Russian Federation, the journal is inscribed in "The List of the Leading Scientific Journals and Editions wherein Main Scientific Results of Theses for Doctor's or Candidate's Degrees Should Be Published"

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

MODELING AND OPTIMIZATION

УДК 004.3

DOI: 10.17587/it.26.499-506

И. Я. Львович¹, д-р техн. наук, проф., office@vivt.ru,
Я. Е. Львович¹, д-р техн. наук, проф., office@vivt.ru,
А. П. Преображенский¹, д-р техн. наук, проф., app@vivt.ru,
О. Н. Чопоров², д-р техн. наук, проф., choporov_oleg@mail.ru,
¹ Воронежский институт высоких технологий,
² Воронежский государственный технический университет

Особенности методов машинного обучения

Проведен комплексный анализ возможностей подходов, базирующихся на машинном обучении, описаны их слабые и сильные стороны, отмечены основные характеристики алгоритма логистической регрессии и рассмотрены задачи, выполняемые с помощью данного алгоритма. Проведен сравнительный анализ алгоритмов.

Ключевые слова: машинное обучение, алгоритм, обработка данных, нейросети, глубокое обучение

Введение

В настоящее время наблюдается рост объема данных в различных сферах, который приводит к необходимости развития методов, связанных с корректной обработкой таких данных. Например, такие крупные компании, как Яндекс или Google, привлекают в качестве инструментария язык программирования R [1] или библиотеки для Python [2]. Это дает возможности для существенного повышения эффективности обработки данных. Помимо программного обеспечения имеют значение разработки по повышению производительности компьютеров. В связи с этим появляется возможность для того, чтобы изучать так называемые большие данные. Их анализ ведется на основе алгоритмов машинного обучения.

Машинное обучение рассматривается в виде подраздела науки об искусственном интеллекте (ИИ). Она связана с построением интеллектуальных машин, которые способны к творческой деятельности, характерной для людей. Например, в 1959 г. работником компании IBM Артуром Самуэлем была написана компьютерная программа для игры в шашки. С определенным положением на доске связывали вес, показывающий вероятность выигрыша. Вначале вероятность рассчитывалась по формуле, в которую входило число шашек и дамок соперников. Но затем Самуэль смог улучшить эффективность такого подхода за счет анализа результатов тысячи партий, и были уточнены

позиционные веса. Уже через 15 лет программу по уровню можно было сопоставить с хорошо подготовленным непрофессиональным игроком. Происходило обучение программы, что можно рассматривать как один из первых примеров машинного обучения [3].

Разработка технологий глубинного обучения осуществлялась подобно тому, как формируется структура мозга людей. При этом в целях обработки данных привлекались искусственные нейронные сети, поскольку их работа аналогична работе нейронов мозга. Сама нейронная сеть должна обрабатывать очень большие потоки данных. Это возможно на базе действующих суперкомпьютеров и внедрения технологий Big Data (большие данные) [4]. Для реализации машинного обучения необходим опыт, данные. Большее число данных в системе определяет повышение точности работы с ними компьютера.

Целью работы является обзор методов машинного обучения, используемых для решения большого числа практических задач.

Анализ алгоритмов классификации в машинном обучении

Машинное обучение бывает нескольких видов:

- контролируемое:
 - классификация,
 - регрессия,
 - обнаружение аномалий;
- неконтролируемое.

Рассмотрим подзадачу контролируемого обучения на примере классификации объектов.

Основное различие между двумя типами обучения заключается в том, что контролируемое обучение выполняется с использованием известных выходных значений для образцов. Поэтому целью данного вида обучения является изучение функции, которая с учетом выборки данных и желаемых результатов наилучшим образом приближает входные и выходные данные. Неконтролируемое обучение не имеет целью определить естественную структуру, присутствующую в наборе точек данных [3, 5].

Задача классификации заключается в том, что имеется некий набор объектов, которые были разделены по неким признакам на определенные классы. Набор объектов конечен, и заранее предопределено, к какому из классов относится целевой объект, — такой набор является обучающей выборкой. Требуется построить алгоритм, который сможет классифицировать произвольный объект из множества.

Отличительной чертой задачи классификации является то, что набор ответов ограничен, и эти ответы называются лейблами или метками классов. Можно сказать, что класс является множеством всех объектов с данным значением метки. Входные данные — это признаковое описание объектов в большинстве случаев, поэтому можно принять, что каждый объект имеет описание, состоящее из набора признаков, которые могут быть числовыми и нечисловыми. Классификация бывает как бинарной (когда требуется разделить объекты по бинарному признаку на два класса), так и мультиномиальной (когда по общим признакам алгоритм распределяет объекты на классы, которые он сочтет нужным).

В качестве первой обучаемой нейронной сети можно рассматривать персептрон Розенблатта. Он дает возможности для решения задач классификации по двум классам при бинарных входных сигналах. Совокупность входных сигналов обозначают в виде n -мерного вектора x . Его элементы рассматриваются как булевы переменные.

Алгоритм усредненного персептрона дает оценку, которая может использоваться для выбора между двумя разными классами. Фактически, алгоритм усредненного персептрона с двумя классами представляет собой простую реализацию нейронной сети [3, 5].

Укажем примеры задач, где алгоритм эффективен.

- *Проведение прогнозов на фондовых рынках.* Имея информацию по ценам акций в течение последней недели, можно сделать прогноз завтрашней цены акций.

- *Обеспечение предоставления кредита.* Необходимо сделать оценку степени риска по предоставлению кредитов для частных лиц. В качестве исходных данных можно рассматривать доход, предыдущую кредитную историю и др.
- *Процессы управления.* Требуется определить, какие действия должен предпринимать робот, используя видеокамеру (делать поворот направо или налево, двигаться вперед и др.), для достижения цели.

Особенность бинарного персептрона состоит в том, что он в качестве функции активации применяет не сигмоид, а единичную ступеньку с уровнем 0,5. Если проводится расчет средних значений весовых коэффициентов, то анализируется бинарный усредненный персептрон.

В практических случаях подбор коэффициента скорости обучения персептрона большей частью осуществляют экспериментальным образом [3—5]: больше шаг — быстрее модель, меньше точность; меньше шаг — число шагов увеличивается, модель замедляется, точность обучения повышается.

Рассмотрим характеристики алгоритма, базирующегося на бинарной байесовской точечной машине. Алгоритм использует байесовский подход к линейной классификации, называемый "машиной байесовской точки". Этот алгоритм эффективным образом позволяет аппроксимировать оптимальное с точки зрения теории байесовское среднее линейных классификаторов за счет выбора одного "среднего" классификатора — точки Байеса. Так как Байес-Пойнт-машина является байесовской классификационной моделью, она не подвержена переобучению. С точки зрения использования на практике байесовской оценки в первую очередь обращают внимание не на точность, а на ковариантность наблюдаемой вероятности. Это связано с тем, что оценка будет иметь большее значение, если будет больше наблюдаемая вероятность события. Также для байесовского подхода характерен тот факт, что параметров мало, нет необходимости в том, чтобы осуществлять нормализацию данных, тогда разные параметры будут вносить разный вклад.

Для большинства наборов данных стандартная установка 30 итераций обучения достаточна для того, чтобы алгоритм делал точные прогнозы. Иногда точные прогнозы можно сделать, используя меньшее число итераций. Рассмотрим бинарное расширенное дерево принятий решений. Идея метода заключается в обучении ансамбля, где второе дерево исправляет ошибки первого дерева, третье дерево исправляет ошибки предыдущих. Прогнозы базируются на совокупности этих деревьев, что на выходе дает

предсказание. Требуются тегированные данные со столбцом значений для каждого ряда.

В каждом внутреннем узле есть соответствие одной из входных переменных; существуют ребра для детей для каждого из возможных значений этой входной переменной. Каждый лист в дереве решений представляет значение целевой переменной, учитывая значения входных переменных, представленных путем от корня до листа [6]. Деревом решений или деревом классификации является дерево, в котором каждый внутренний (не листовой) узел помечен функцией ввода. Дуги, идущие от узла с меткой входной функции, помечены каждым из возможных значений целевого или выходного признака, или дуга приводит к подчиненному узлу решения с другой функцией ввода [7, 8]. Каждый лист дерева помечен классом или распределением вероятности по классам.

Существуют бинарные леса принятия решений, представляющие собой быстрые, контролируемые ансамблевые модели. Методы ансамбля основаны на общем принципе. В нем вместо рассмотрения одной модели осуществляют построение обобщенных моделей, что значительно улучшает результаты. Далее модели связываются и объединяются. Как правило, модели ансамбля обеспечивают лучший охват и точность, чем отдельные деревья решений.

Преимуществами ансамблевых моделей являются:

- охват границы нелинейных решений;
- интегрирование выбора функций в процессы обучения и классификации;
- использование зашумленных данных;
- необходимость меньшего числа действий для очистки данных;
- тип данных не является ограничением: он может обрабатывать как числовые, так и категориальные переменные.

Недостатки ансамблевых моделей:

- переобучение модели не всегда простым образом реализуется на практике для деревьев решений. Эта проблема решается путем установки ограничений на параметры обучающейся модели;
- при работе с непрерывными числовыми переменными дерево решений теряет информацию, когда оно классифицирует переменные в разных категориях.

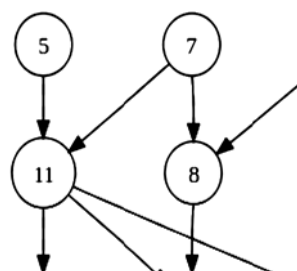
Существуют бинарные джунгли принятия решений. Рандомизированные деревья решений и леса характеризуются богатой историей машинного обучения. Можно увидеть существенные успехи в применении, особенно это относится к компьютерному зрению. При этом в них есть фундаментальное ограничение: ког-

да есть достаточно данных, то число узлов для деревьев решений будет экспоненциальным образом возрастать с глубиной. В определенных приложениях, например, для мобильных или встроенных процессоров, можно рассматривать память в виде ограниченного ресурса. В связи с этим вследствие экспоненциального роста деревьев будет ограничение по их глубине. Ограничена и их потенциальная точность. Для решения можно предложить использовать метод джунглей. Анализ по ансамблям деревьев решений, связанных с ациклическими графами (DAG) (см. рисунок) демонстрирует, что они рассматриваются в виде компактных и мощных дискриминационных моделей в ходе классификации. DAG в принятии решений отличается от традиционных деревьев решений тем, что есть возможности для реализации нескольких путей от корня к каждому из листьев.

Направленным ациклическим графом является орграф, для которого нет направленных циклов. При этом могут наблюдаться "параллельные" пути, которые будут идти из одного узла и вести к конечному узлу. Направленный ациклический граф рассматривается в виде обобщения леса деревьев. Каждый узел знает только о предыдущем узле, возможность прийти другим путем, который будет более коротким или точным, неизвестна [7, 8].

Направленные ациклические графы часто применяются при обработке данных, планировании, поиске наилучшего маршрута в навигации и сжатии данных. В основном указанный подход применяется в области финансов и ценных бумаг. Данная структура помогает отслеживать и предугадывать ценовые тренды несмотря на общие финансовые показатели рынка.

Опорные векторные машины (SVM) — весьма популярный и хорошо изученный класс контролируемых моделей обучения, которые могут использоваться в задачах линейной и нелинейной классификации [9]. В последних исследованиях основное внимание уделялось способам оптимизации этих моделей для эффективного масштабирования до более круп-



Схематичное представление взаимодействия узлов ациклического графа (DAG)

ных наборов учебных материалов. В этой реализации от Microsoft Research функция ядра, используемая для сопоставления точек данных с пространством объектов, специально предназначена для сокращения времени, необходимого для обучения, при сохранении большей части точности классификации [10, 11].

После того, как исследователь определяет параметры модели, подготавливается помеченный набор данных в качестве входных данных для модели в целях обучения или для определения гиперпараметров. Затем обученная модель может использоваться для прогнозирования значений для новых входных данных. Данный способ классификации характеризуется весьма широким применением: от задач по распознаванию образов или формирования спам-фильтров до вычислений, показывающих распределения по горячим алюминиевым частицам внутри ракетных выхлопов. Несмотря на то, что подход первоначально был связан с бинарными классификаторами, могут быть возможности для его работы в задачах мультиклассификации.

Рассмотрим устройство алгоритма машины опорных векторов на простом примере. Допустим, у нас на столе лежит множество синих и красных шариков. Если они расположены не в абсолютном беспорядке, то плоскостью мы можем поделить стол на части, попытавшись максимально точно отсортировать шарики по цветам, и, когда добавляется новый шар одного из цветов, будет известно на какую часть стола его положить [10].

Самым большим преимуществом алгоритма машины опорных векторов является тот факт, что он самостоятельно определяет функцию гиперплоскости. Если же шары находятся в сильно перемешанном состоянии, то плоскость здесь не поможет. Но если все шары подкинуть в воздух, то их уже можно будет попробовать разделить листом бумаги. Таким образом, используя повышение разрядности пространства, мы получаем новые возможности для классификации. Использование нуль-пространства (или ядра) матрицы дает отличный инструмент для работы в пространствах более высокой разрядности, где лист бумаги по-прежнему является гиперплоскостью, но уже используется не линейная функция, а функция плоскости.

Предположим, у нас есть набор данных о пациентах, у каждого из них есть показатели: пульс, возраст, анализы, привычки, патологии и т.д. Каждый из параметров является измерением пространства. В результате работы алгоритма машины опорных векторов отображает эти параметры в высшее измерение, находит функцию гиперплоскости и классифицирует

объекты. Бинарная, усиленная машина опорных векторов (LD-SVM) является реализацией Microsoft для класса векторных машин.

Рассмотрим особенности *бинарной нейронной сети*. Проведение классификации на базе нейронных сетей можно считать контролируемым методом обучения. Например, такая модель нейронной сети может применяться, чтобы прогнозировать бинарные результаты: существование некоторого заболевания у пациентов или поломку компьютера в течение заданных временных интервалов. Входы являются первым уровнем нейронной сети и подключены к выходному уровню ациклическим графом, состоящим из взвешенных ребер и узлов. Когда нейронная сеть обучается на базе входных данных, изучается связь значений на входах и выходах. Все нейроны, которые находятся на одном уровне, связаны ребрами со всеми нейронами следующего уровня, при этом каждое ребро обладает весом. Для вычисления выхода сети для конкретного входа вычисляется значение для каждого узла в скрытых слоях и на выходном уровне и вычисляется взвешенная сумма значений узлов из предыдущего слоя. После этого к взвешенной сумме применяется функция активации. При обучении нейронных сетей важно правильно выбирать коэффициент скорости обучения, который позволяет управлять величиной коррекции весов на каждой итерации. Большие значения этого параметра ведут к ускорению работы алгоритма, Но при этом может произойти снижение точности настройки модели на минимум функции ошибки, тогда есть вероятность увеличения ошибки обучения. Малые значения коэффициента определяют меньший шаг в коррекции весов. Тогда получается, что число итераций в обучении растет, это определяет уменьшение ошибки обучения. На практике подбор коэффициента скорости обучения выполняют экспериментальным образом.

Алгоритм логистической регрессии для бинарной классификации

Логистическая регрессия (Logistic regression) — это подход, позволяющий строить линейный классификатор для оценок апостериорных вероятностей того, принадлежат ли объекты классам [12, 13]. Другими словами, это тип алгоритма классификации, включающий линейный дискриминант. Регрессия — это метод моделирования целевого значения на основе независимых предсказателей. Этот метод в основном используется для прогнозирования и выяснения причинно-следственной связи между переменными.

Методы регрессии в основном различаются в зависимости от числа независимых переменных и типа отношения между независимыми и зависимыми переменными [14]. В отличие от фактической регрессии логистическая регрессия не пытается предсказать значение числовой переменной с учетом набора входных данных. Вместо этого выходом (результатом) логистической регрессии является вероятность того, что данная входная точка принадлежит определенному классу. Для простоты предположим, что мы рассматриваем только два класса "+" и "-" (для многоклассовых задач существует многолинейная логистическая регрессия), а выходом P_+ является вероятность того, что определенная точка данных принадлежит классу "+". Для определения принадлежности входной точки классу "-" будем соответственно говорить о вероятности $P_- = 1 - P_+$. Центральной посылкой логистической регрессии является предположение о том, что входное пространство можно разделить на две четкие "области" для каждого из двух классов линейной границей. Для двух измерений это прямая линия, для трех измерений это уже плоскость и т.д.

Как в логистической регрессии используется такая линейная граница для количественной оценки вероятности точки данных, принадлежащей определенному классу? Дадим геометрическую интерпретацию этого "деления" входного пространства на две разные области. Рассмотрим для простоты двумерное пространство (x_1, x_2) , уравнение прямой в котором имеет вид

$$B_0 + B_1x_1 + B_2x_2,$$

где B_0, B_1, B_2 — коэффициенты.

Теперь в зависимости от расположения точки с координатами (a, b) есть три возможных сценария:

- точка (a, b) лежит в области, определяемой точками класса "+". В результате значение $B_0 + B_1a + B_2b$ будет положительным, лежащим в интервале $(0, \infty)$. Чем больше это значение, тем больше расстояние между точкой и границей и больше вероятность того, что точка (a, b) принадлежит классу "+". Следовательно, P_+ будет лежать в интервале $[0,5; 1]$ [12];
- точка (a, b) лежит в области, определяемой точками класса "-". В этом случае значение $B_0 + B_1a + B_2b$ будет отрицательным, лежащим в интервале $(-\infty, 0)$. Чем больше по модулю это значение, тем больше расстояние между точкой и границей и больше вероятность, что точка (a, b) принадлежит классу "-". Следовательно, P_- будет лежать в интервале $[0; 0,5]$;

- точка (a, b) лежит на границе. В этом случае $B_0 + B_1a + B_2b = 0$. Это означает, что модель не может сказать, принадлежит ли точка (a, b) это классу "+" или классу "-". В результате P_+ будет равно 0,5.

Таким образом, получена функция, которая имеет значение, лежащее в интервале $(-\infty, +\infty)$ с учетом входной точки данных. Но как сопоставить бесконечный интервал возможных значений функции с вероятностью P_+ , которая лежит в ограниченном интервале $[0, 1]$?

Ответ дает функция шансов [12].

Обозначим $P(X)$ — вероятность события X . Отношение шансов $OR(X)$ определим выражением $P(X)/(1 - P(X))$, которое является отношением вероятности события к вероятности того, что оно не происходит. $P(X)$ принимает значения от 0 до 1, а $OR(X)$ — значения от 0 до ∞ . Но этого по-прежнему недостаточно, потому что граничная функция должна быть определена в диапазоне $(-\infty, +\infty)$. Для этого необходимо взять логарифм от $OR(X)$, потому что $\log(OR(X))$ определен в диапазоне от $-\infty$ до $+\infty$.

В рассматриваемом примере логистическая регрессия заключается в следующем:

Шаг 1. Вычисление граничной функции (в качестве альтернативы, коэффициенты логарифмической функции) $t = B_0 + B_1a + B_2b$.

Шаг 2. Получение коэффициента $OR_+ = e^t$ (так как t — это логарифм OR_+).

Шаг 3. Вычисление P_+ с использованием простого соотношения $P_+ = \frac{OR_+}{1 + OR_+}$.

Таким образом, как только известно t с шага 1, можно комбинировать шаги 2 и 3, чтобы получить соотношение $P_+ = \frac{e^t}{1 + e^t}$, что и будет являться логистической функцией.

Анализ задач, решаемых с помощью логистической регрессии в машинном обучении

Рассмотрим задачи бинарной классификации на основе логистической регрессии, где необходимо разделить объекты по признаку на два класса.

- **Задача диагностики.** В медицине одной из популярных задач является задача подтверждения диагноза на основе различных факторов и признаков пациентов. Алгоритм принимает решение о вероятности события подтверждения диагноза, основываясь на связях, данных, на которых он обучается. Обучающей выборкой здесь выступают данные о пациентах, которые имеют различные параметры: возраст, пол, социальная группа, результаты анализов, привычки и т. д. Для

каждого пациента установлен бинарный параметр, который указывает на результат (0 — диагноз не подтвердился, 1 — диагноз подтвержден). После обучения на этих данных, модель строит для себя связи, и при подаче параметров нового неизвестного пациента делает предположение о том, подтвержден диагноз у пользователя или нет.

- *Скоринговые модели.* Задача "подсчета очков" возникает в тех сферах деятельности, где требуется предсказать поведение объекта на основе признаков и данных, которые для него характерны. Наиболее популярная сфера — банковская. Банк, основываясь на большом числе признаков, должен принять решение о выдаче кредита заявителю. Параметры могут быть самыми разнообразными: возраст, средний доход, максимальный доход, кредитная история, стаж работы, общий стаж работы, пол, наличие судимости.

Таких признаков может быть сколь угодно много в обучающей выборке, но главное, что для каждого объекта определен результирующий параметр, например, 0 — клиент не надежный, 1 — кредит можно одобрять.

Задачи бинарной классификации возникают всегда, когда нужно выбрать между двух вариантов. Примерами могут быть следующие ситуации:

- сотрудник безопасности, проверяя посетителя, должен принять решение, основываясь на внешних признаках посетителя, уровне доступа и т. д., пропустить его или нет;
- поисковый робот, найдя документ в мировой сети, должен принять решение — добавлять его в базу индексации или нет;
- клиент смотрит на различные условия банков, принимает решение о том, открывать счет или нет;
- инвестор принимает решение о финансировании проекта.

В основе алгоритма логистической регрессии лежит принцип, что прогнозируется не значение результата (или номера класса), а вероятность того, что результат для нового объекта принимает значение 1. На основе этой вероятности принимается решение о том, к какому классу отнести новый экземпляр. Несмотря на то что решения вроде бы очевидны, сравниваются полученные вероятности с пороговым значением 50 %, но при этом необходимо учитывать дополнительные ошибки при принятии решения.

К примеру, в задачах медицинской диагностики врач заподозрил, что пациент серьезно болен. Варианты здесь следующие:

- с одной стороны, если предположение неверно, но гипотеза одобрена, это приведет минимум к лишним расходам на лекарства,

а в худшем — к ухудшению состояния здоровья, потому что пациент лечился не от того заболевания;

- с другой стороны, если предварительный диагноз был правильным, но гипотеза отвергнута, пациент может не получить должного лечения, и это может привести к печальным последствиям.

Можно сделать вывод, что пороговое значение должно быть выбрано не по умолчанию, а исходя из соображения минимизации возможных потерь, вызванных совершением ошибок.

Достоинства алгоритма логистической регрессии:

- он хорошо и подробно изучен;
- адаптирован под большие объемы данных, скорость позволяет молниеносно обрабатывать огромные наборы данных;
- является практически единственным алгоритмом для разрозненных данных с огромным числом признаков;
- логистическая регрессия определяет вероятность отношения к разным классам;
- в модели может быть построена и нелинейная граница, если на вход будут поданы полиномиальные признаки.

Недостатки алгоритма логистической регрессии:

- плохо работает для задач, по которым зависимость ответов от признаков — сложная, нелинейная;
- в практических случаях нередко не выполняются предположения теоремы Маркова—Гаусса, в связи с этим работа линейных методов чаще будет менее лучшей, если, например, сравнивать с SVM и методом ансамблей.

Результаты анализа методов

В таблице приведены характеристики алгоритмов бинарной классификации. Как можно заметить, все алгоритмы могут использоваться как для бинарной, так и для мультиномиальной классификации.

Анализ алгоритмов бинарной классификации, которые были рассмотрены выше, показывает, что лучшие результаты по точности предсказания показывают алгоритмы лесов принятия решений, джунглей, усиленные деревья, а также нейронные сети и алгоритмы на основе байесовских принципов (SVM [14] и байесовская точечная машина [15]). Алгоритмы логистической регрессии, персептрона и усиленной машины опорных векторов показывают хороший результат, но в силу особенностей самих алгоритмов это вполне предсказуемый ре-

Сравнительный анализ алгоритмов бинарной классификации

Подход для классификации	Точность	Время обучения	Линейность	Адаптируемость	Объем данных
Логистическая регрессия	Хорошо	Быстрое	Отлично	Хорошо	Малый—большой
Лес решений	Отлично	Умеренное	Хорошо	Хорошо	Малый—большой
Джунгли решений	Отлично	Умеренное	Хорошо	Хорошо	Большой
Нагруженное дерево решений	Отлично	Умеренное	Хорошо	Хорошо	Большой
Нейронная сеть	Отлично	Медленное	Умеренное	Отлично	Среднее
Взвешенный персептрон	Хорошо	Умеренное	Отлично	Умеренное	Среднее
Машина опорных векторов	Отлично	Умеренное	Отлично	Хорошо	Большой
Усиленная машина опорных векторов	Хорошо	Медленное	Хорошо	Отлично	Большой
Байесовский классификатор	Умеренное	Умеренное	Отлично	Умеренное	Среднее

зультат, так как в зависимости от числа классов будут меняться параметры и регуляризация.

По скорости обучения логистическая регрессия выигрывает, она действительно признана одним из популярных алгоритмов за счет скорости обучения и своей простоты. В то же время нейронные сети и усиленная машина опорных векторов являются довольно медленными в силу сложности устройства самих алгоритмов, остальные алгоритмы варьируются по показателям в зависимости от настроек. По кастомизации, очевидно, преуспевают такие алгоритмы, как нейронные сети и усиленная машина опорных векторов, поскольку их можно настроить за счет различных параметров, увеличивая их продуктивность и точность (например, в нейронных сетях можно настраивать число скрытых слоев, число узлов в каждом слое). Одним из важных критериев является то, с какими данными работают алгоритмы; в сводной таблице приведены результаты, показывающие, что для относительно небольших наборов данных будут полезны алгоритмы логистической регрессии и лес принятия решений, в то время что для больших наборов данных более приемлемы алгоритмы джунглей принятия решений и усиленное дерево принятия решений, а также алгоритмы на базе машин опорных векторов.

Рассмотренные выше подходы объединены в студии машинного обучения Azure [16]. Она является целой платформой, которая предназначена для создания, тестирования и развертывания решений для бизнес-аналитики и создания прогнозов на основе данных. Она зарекомендовала себя среди крупных компаний, использующих данный продукт, так как это центральный узел, где собраны многие элементы аналитики, данных и ресурсов. Помимо этого, платформа предлагает на выбор большой набор инструментов и готовых самых популярных алгоритмов для предоставления желаемых мощностей пользователям.

Студия машинного обучения Azure поддерживает язык R [1] для работы с Big Data, а также язык Python [2], который содержит в себе огромные дополнительные возможности для работы с алгоритмами машинного обучения. Основные преимущества, которые получает исследователь:

- для импорта данных из хранилищ Azure и систем hdfs нет установленного предела данных;
- гибкость в политике ценообразования;
- существует множество готовых наборов данных и алгоритмов;
- исследователь может опубликовать свою модель данных в виде веб-сервиса;
- исследователи могут публиковать эксперименты для моделей данных всего за несколько минут, тогда как ученым-экспертам может потребоваться несколько дней, чтобы сделать то же самое;
- чем больше времени исследователь применяет модель, тем больше данных прогнозируется. Например, если тренировать собственную модель в течение нескольких месяцев, можно ожидать ошибок всего один или два раза за все время.

Среди недостатков данной студии можно указать:

- набор GUI алгоритмов довольно ограниченный, но можно подключать модули на языках R и Python;
- цена будет существенно возрастет по мере возрастания используемых мощностей. При использовании бесплатной подписки в Azure предоставляется ограниченное хранилище данных;
- большинство алгоритмов и преобразований имеют ограниченный набор настроек параметров.

Заключение

В работе проведен анализ различных алгоритмов бинарной классификации, которые

используются в машинном обучении. Кроме того, рассмотрены ситуации, когда лучше всего использовать тот или иной алгоритм машинного обучения. Кратко описаны возможности студии машинного обучения Azure.

Список литературы

1. Кабаков Р. R в действии. М.: ДМК-Пресс, 2014. 588 с.
2. Маккинли У. Python и анализ данных / Пер. с англ. М.: ДМК Пресс, 2015. 482 с.
3. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. The MIT Press, 2016. 801 с.
4. Айвазян С. А. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.
5. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. Springer, 2009. 533 p.
6. Howard D. ITIL Release Management: A Hands-on Guide. M.: CRC Press, 2010. 344 с.
7. Rokach L., Maimon O. Data Mining with Decision Trees: Theory and Applications. World Scientific Publishing, 2008.
8. Long J. ITIL Version 3 at a Glance: Information Quick Reference. Boston, MA: Springer, 2008. 974 с.
9. Воронцов К. В. Лекции по линейным алгоритмам классификации. URL: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/6/68/voron-ML-Lin.pdf> (дата обращения: 30.03.2020).
10. Statnikov A., Aliferis C. F., Hardin D. P. A Gentle Introduction to Support Vector Machines in Biomedicine: Theory and methods. World Scientific, 2011.
11. Cristianini N., Shawe-Taylor J. An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods. Cambridge University Press, 2000.
12. Hosmer D. W., Lemeshow S. Applied Logistic Regression. New York: Chichester — Wiley, 2002. 383 p.
13. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Пер. с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2007. 912 с.
14. Кесман В. Learning and Soft Computing. Support Vector Machines, Neural Networks, Fuzzy Logic Systems. The MIT Press, Cambridge, MA, 2001. 608 p.
15. Вьюгин В. Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования. М.: МЦМНО, 2013. 390 с.
16. Документация по Azure. URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/azure/> (дата обращения: 30.03.2020).

I. Ya. Lvovich¹, Professor, e-mail: office@vivt.ru, Ya. E. Lvovich¹, Professor, e-mail: office@vivt.ru,
A. P. Preobrazhensky¹, Associate Professor, e-mail: app@vivt.ru,
O. N. Choporov², Professor, e-mail: choporov_oleg@mail.ru,

¹Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russian Federation,

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

The Features of Machine Learning Methods

The paper provides a comprehensive analysis of the capabilities of approaches based on machine learning, describes their weaknesses and strengths. The types of machine learning are indicated. The subtask of supervised learning is considered on the example of the classification of objects. The parameters of the binary averaged perceptron are noted. The characteristics of an algorithm based on a binary Bayesian point machine are considered. The advantages and disadvantages of ensemble models are indicated. The features of a binary neural network are considered. The main characteristics of the logistic regression algorithm, advantages and disadvantages are noted. The tasks performed using this algorithm are considered, in which it is necessary to classify objects according to their characteristics into two classes: diagnostic problems, scoring models. The summary table compares the binary classification algorithms for accuracy, training time, linearity, adaptability, data volumes. The features of the Azure machine learning studio, in which the analyzed approaches are applied, are shown.

Keywords: machine learning, algorithm, data processing, neural networks, deep learning

DOI: 10.17587/it.26.499-506

References

1. Kabakov R. R in action, Moscow, DMC-Press, 2014, 588 p. (in Russian).
2. Makkinly U. Python and data analysis. Trans. from English, Moscow, DMC-Press, 2015, 482 p. (in Russian).
3. Goodfellow I. Deep Learning, Publishing house The MIT Press, 2016, 801 p.
4. Ayvasyan S. A. Applied statistics: classification and dimensionality reduction, Moscow, Finance and statistics, 1989, 607 c. (in Russian).
5. Hastie T. The Elements of Statistical Learning, 2nd edition, Springer, 2009, 533 p.
6. Howard D. ITIL Release Management: A Hands-on Guide, Moscow, CRC Press, 2010, 344 p.
7. Rokach L. Data Mining with Decision Trees: Theory and Applications, World Scientific Publishing, 2008.
8. Long J. ITIL Version 3 at a Glance: Information Quick Reference, Boston, MA, Springer, 2008, 974 p.
9. Vorontsov K. V. Lectures on linear classification algorithms, available at: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/6/68/voron-ML-Lin.pdf> (accessed: 03.30.2020).
10. Statnikov A. A Gentle Introduction to Support Vector Machines in Biomedicine: Theory and methods, World Scientific, 2011 (in Russian).
11. Cristianini N. An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods, Cambridge University Press, 2000.
12. Hosmer D. W., Lemeshow S. Applied Logistic Regression, New York, Chichester, Wiley, 2002, 383 p.
13. Draper N. Applied regression analysis, Moscow, Williams Publishing House, 2007, 912 c.
14. Kecman V. Learning and Soft Computing. Support Vector Machines, Neural Networks, Fuzzy Logic Systems, The MIT Press, Cambridge, MA, 2001, 608 p.
15. Vyugin V. Mathematical foundations of the theory of machine learning and forecasting, ICMNO, 2013, 390 p. (in Russian).
16. Azure Documentation, available at: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/azure/> (accessed: 03.30.2020) (in Russian).

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS

УДК 004.3:612.8

DOI: 10.17587/it.26.507-514

О. Г. Щербань, канд. техн. наук, доц., e-mail: shchero@mail.ru,
И. В. Щербань, д-р техн. наук, проф., e-mail: shcheri@mail.ru,
Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону,
П. В. Лобзенко, канд. техн. наук, доц., e-mail: pasha.van@list.ru,
Московский технический университет связи и информатики

Метод поиска высокочастотных паттернов в составе зашумленных многомерных сигналов в реальном времени¹

Разработан метод поиска и локализации во времени высокочастотных паттернов в составе зашумленных выходных сигналов многомерных динамических объектов в реальном времени наблюдений. На основе аппарата многомерного сингулярного анализа синтезирован полосовой фильтр, адаптивный к вариациям характеристик наблюдаемого сигнала, применение которого к исходному сигналу обеспечивает требуемую чувствительность критериальной функции при поиске паттернов низкой интенсивности.

Ключевые слова: многомерный сингулярный спектральный анализ, адаптивный полосовой фильтр, метрика Хаусдорфа

Введение

Задачи анализа выходных сигналов технологических объектов, технических систем или иных динамических модулей получили широкое практическое распространение. Изменения режимов функционирования исследуемых объектов, всевозможные переходные процессы нередко находят отражение в регистрируемых выходных сигналах в виде различных структурных особенностей — всплесков, аномалий, коротких осцилляций различного частотного диапазона. Временная локализация и идентификация характеристик подобных частотно-временных паттернов обычно позволяет выполнять процедуры диагностирования объектов, или поиска и локализации неисправностей [1, 2], используется в процедурах неразрушающего контроля, в биомедицинских приложениях [3—5], позволяет понять особенности функционирования объектов в условиях возмущений [6], решать другие практические задачи.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Постановления №218 "Создание программного комплекса для управления человеческим капиталом на основе нейротехнологий для предприятий высокотехнологического сектора Российской Федерации" (Шифр: 2019-218-11-8185, внутренний номер ХД/19-22-НН).

Несмотря на то, что методы поиска таких паттернов в составе многомерных сигналов в настоящее время достаточно хорошо изучены [1, 6], проблемы в некоторых частных случаях все же существуют. Например, в условиях высокой априорной неопределенности частотных и временных характеристик паттернов, при маскировании их осцилляциями, вызванными неизвестными процессами, в условиях высокой зашумленности измеренных сигналов часто невозможно получить достаточную и подробную статистическую информацию об объекте. В работах [7, 8] рассмотрены методы поиска высокочастотных паттернов низкой интенсивности в составе зашумленных многомерных сигналов, работоспособные в условиях, когда характеристики паттернов близки к характеристикам шумовых составляющих сигналов, а точные границы частотных спектров паттернов априорно неизвестны. Общим недостатком представленных в работах [7, 8] методов является тот факт, что они могут быть использованы только лишь апостериорно. Однако известно, что во многих практических задачах поиск и временная локализация паттернов должны выполняться в реальном времени наблюдений динамического объекта [1, 6, 9, 10].

Таким образом, представляет научный и практический интерес излагаемый далее метод

поиска и временной локализации коротких высокочастотных паттернов низкой интенсивности в составе зашумленных выходных сигналов многомерных динамических объектов в реальном времени наблюдений этих сигналов.

1. Формализация задачи, ее декомпозиция, выбор инструментария для решения

Предполагается, что исследуемый динамический объект характеризуется измеряемым выходным многомерным сигналом

$$\mathbf{S}(t) = (s_1(t) \ s_2(t) \ \dots \ s_J(t))^T,$$

где J — число каналов наблюдений; $t \in [t_0; T]$ — независимая переменная (время); t_0 — начальный момент времени измерений, в общем случае равный нулю; T — текущий временной интервал измерений; T — знак транспонирования.

Соответственно, в момент времени T каждая j -я ($j = \overline{1, J}$) компонента $\mathbf{S}_j(T)$ многомерного сигнала $\mathbf{S}$ представляется накапливаемым временным рядом $\mathbf{S}_j(T) = \{s_{j,k}\}_{k=1}^{N_k}$ объемом $N_k = T/\Delta t$ чисел, где Δt — шаг дискретизации. В составе наблюдаемого сигнала $\mathbf{S}(t)$ предполагается наличие периодических коротких высокочастотных осцилляций низкой интенсивности, отражающих какие-либо особенности функционирования исследуемого динамического объекта и существующих на коротких временных интервалах, существенно меньших интервала времени измерений T . Требуется найти положение по оси времени подобных паттернов при допустимости вариаций по каналам измерений форм паттернов.

Решение сформулированной задачи предлагается осуществлять на основе последовательного выполнения следующих двух процедур. Вначале целесообразно выполнить фильтрацию исходного многомерного сигнала с целью выделить тот частотный диапазон, который примерно соответствует спектру частот искомым паттернов. Это, несомненно, повысит чувствительность критериальной функции, которую следует использовать далее, после фильтрации, в целях поиска паттернов уже в узкополосном многомерном сигнале.

Исходя из требования к реализации процесса поиска в реальном времени наблюдений необходимо предусмотреть возможность адаптации используемых процедур фильтрации к вариациям параметров регистрируемого сигнала $\mathbf{S}(t)$. Известно, что так называемый аппарат сингулярного спектрального анализа (*Singular*

Spectrum Analysis, SSA), в русскоязычном варианте именуемый "гусеница", фактически представляет собой набор из M линейных полосовых фильтров [11–14]. В отличие от традиционных фильтров, основанных на преобразовании Фурье [6, 15], дискретном или непрерывном вейвлет-разложениях сигналов [16], фильтры на основе *SSA* обладают адаптивностью к изменениям характеристик исходного сигнала и легко перестраиваются в реальном времени. Это позволяет разделять гармонические компоненты, даже пересекающиеся в частотно-временном пространстве (при определенных условиях). Таким образом, например, решены задачи удаления низкочастотных артефактов из электроэнцефалограмм (ЭЭГ) [17, 18], качественного подавления высокочастотного шума [19], высокоточной фильтрации сигналов [20]. В работе [17] синтезирован метод автоматического удаления низкочастотных артефактов в реальном времени регистрации сигналов ЭЭГ. Метод был разработан для обеспечения возможности технической реализации портативных носимых устройств, регистрирующих ЭЭГ мозга человека.

Последующий после фильтрации анализ сигналов можно осуществлять на основе сравнения двух текущих соседних неперекрывающихся временных выборок (окон), равных по объему и содержащих по $n < N_k$ одноименных отсчетов с каждого j -го ($j = \overline{1, J}$) канала измерений. Иными словами, если в текущем окне в составе многомерного сигнала присутствуют искомые паттерны — какие-либо структурные особенности, высокочастотные осцилляции, отличающие эту временную выборку от предыдущей временной выборки, — то этот факт должна отражать соответствующая критериальная функция. Таким образом, с дискретностью n отсчетов можно определить временные границы начала и окончания искомым паттернов в составе зашумленных выходных сигналов многомерных динамических объектов в реальном времени их наблюдений.

2. Метод и алгоритм поиска структурных особенностей в составе зашумленных многомерных сигналов в реальном времени измерений

Применительно к сигналу $\mathbf{S}(t)$ будем использовать многомерный *SSA* (*Multi-channel SSA, MSSA*) [14]. Для уменьшения влияния так называемых "граничных эффектов" аппарат

MSSA будем применять не отдельно к каждой временной выборке, а на всем текущем временном интервале наблюдений T , т. е. будем применять его ко всему накопленному J -мерному временному ряду из N_k отсчетов.

Согласно концепции *MSSA* [14] составим блочную траекторную матрицу

$$\mathbf{X}(T) = (\mathbf{X}_1 | \mathbf{X}_2 | \dots | \mathbf{X}_j | \dots | \mathbf{X}_J), \quad (1)$$

$$\text{где } X_j = \begin{pmatrix} s_{j,1} & s_{j,2} & \dots & s_{j,k} & \dots & s_{j,K} \\ s_{j,2} & s_{j,3} & \dots & s_{j,k+1} & \dots & s_{j,K+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{j,M} & s_{j,M+1} & \dots & s_{j,M+k} & \dots & s_{j,N_k} \end{pmatrix} —$$

ганкелева матрица размерности $\dim(X_j) = M \times K$, формируемая для каждой j -й составляющей ЭЭГ в отдельности; M — длина гусеницы (размерность вложения); $K = N_k - M + 1$. Сингулярное разложение усредненной выборочной корреляционной матрицы

$$\mathbf{C} = \frac{1}{K} \mathbf{X} \mathbf{X}^T$$

имеет вид

$$\mathbf{C} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T,$$

где $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{MJ})$ — диагональная матрица собственных чисел; $\mathbf{V} = (\mathbf{V}_1 \dots \mathbf{V}_i \dots \mathbf{V}_{MJ})$ — ортогональная матрица собственных векторов $\mathbf{V}_i$ матрицы $\mathbf{C}$, $\dim(\mathbf{V}_i) = (MJ) \times 1$. Используя процедуру упорядочения собственных векторов $\mathbf{V}_i$ по убыванию соответствующих собственных чисел $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{MJ} \geq 0$ далее вычисляем матрицу нецентрированных главных компонент, а восстанавливаемую матрицу $\tilde{\mathbf{X}}(T)$ при этом рассчитываем как сумму

$$\tilde{\mathbf{X}}(T) = \sum_{m=1}^M \tilde{\mathbf{X}}_m(T) \quad (2)$$

блочных ганкелевых матриц $\tilde{\mathbf{X}}_1 = (\tilde{\mathbf{X}}_{1,1} | \tilde{\mathbf{X}}_{1,2} | \dots | \tilde{\mathbf{X}}_{1,J})$, $\tilde{\mathbf{X}}_2 = (\tilde{\mathbf{X}}_{2,1} | \tilde{\mathbf{X}}_{2,2} | \dots | \tilde{\mathbf{X}}_{2,J})$, ..., $\tilde{\mathbf{X}}_M = (\tilde{\mathbf{X}}_{M,1} | \tilde{\mathbf{X}}_{M,2} | \dots | \tilde{\mathbf{X}}_{M,J})$, порожденных соответствующими собственными векторами $\mathbf{V}_i$ матрицы $\mathbf{C}$. В ходе исследований было выяснено, что в дополнительных процедурах центрирования по столбцам и нормирования по среднеквадратическим отклонениям исходной траекторной матрицы $\mathbf{X}$ (1) с последующим децентрированием и денормированием восстановленной матрицы $\tilde{\mathbf{X}}$ (2) [12, 14] необходимости нет.

Применение процедур антидиагонального усреднения к каждой из матриц $\tilde{\mathbf{X}}_1, \dots, \tilde{\mathbf{X}}_M$ (2)

позволяет сформировать M соответствующих узкополосных многомерных сигналов вида

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{S}}_1(T) &= (\tilde{\mathbf{S}}_{1,1} \tilde{\mathbf{S}}_{1,2} \dots \tilde{\mathbf{S}}_{1,J}), \dots, \\ \dots \tilde{\mathbf{S}}_M(T) &= (\tilde{\mathbf{S}}_{M,1} \tilde{\mathbf{S}}_{M,2} \dots \tilde{\mathbf{S}}_{M,J}). \end{aligned} \quad (3)$$

При этом каждый m -й ($m = \overline{1, M}$) многомерный сигнал $\tilde{\mathbf{S}}_m(T)$ из соотношений (3) ограничен полосой частот $f_m \in [f_m^H, f_m^B]$, где f_m^H, f_m^B — верхняя и нижняя границы его частотного спектра. Иными словами, процедура *MSSA* представляет собой фильтрацию исходного сигнала набором из M линейных полосовых фильтров, посредством чего каждый j -й исходный временной ряд $\tilde{\mathbf{S}}_{1,j}(T), \dots, \tilde{\mathbf{S}}_{M,j}(T)$ разделяется на M временных рядов $\tilde{\mathbf{S}}_{1,j}(T), \dots, \tilde{\mathbf{S}}_{M,j}(T)$, частотные спектры которых

$$\begin{aligned} \Delta F_{1,j} &= f_{1,j}^B - f_{1,j}^H, \dots, \Delta F_{M,j} = f_{M,j}^B - f_{M,j}^H; \\ j &= \overline{1, J}, \end{aligned} \quad (4)$$

могут пересекаться, но верхние границы спектров упорядочены по возрастанию $f_{1,j}^B \leq f_{2,j}^B \leq \dots \leq f_{M,j}^B$, а $f_{M,j}^B = 0,5f_s$, где $f_s = 1/\Delta t$ — частота дискретизации. Таким образом, характеристики полосовых фильтров (ПФ) определяются размерностью вложения M . Задавая различные значения размерности вложения M и выбирая по определенному правилу из найденных M узкополосных многомерных сигналов лишь некоторые, можно реализовать фильтрацию измеренного сигнала $\mathbf{S}(T)$ [12, 17, 20].

В решаемой задаче в составе сигнала $\mathbf{S}(T)$ предполагается поиск относительно высокочастотных осцилляций. Поэтому для повышения чувствительности такого поиска необходим ПФ с полосой пропускания, максимально соответствующей частотному спектру искомым паттернов. Ясно, что ПФ, синтезируемый на основе *MSSA*, можно реализовать посредством восстановления сигнала не по всем M , а лишь по некоторым $M' < M$ узкополосным сигналам из соотношений (3) следующим образом:

$$\tilde{\mathbf{S}}'_\Sigma(M', T) = \sum_{m=m_H}^{m_B} \tilde{\mathbf{S}}_m(T); M' = m_B - m_H + 1, \quad (5)$$

где m_H, m_B — номера, соответственно, самого низкочастотного и самого высокочастотного из учитываемых узкополосных сигналов $\tilde{\mathbf{S}}_m(T)$ (3). Усредненный спектр $\Delta F'$ суммар-

Размерности выборок для расчета МХ одинаковы и равны $n < N_k$. Свойства адаптивности синтезированного ПФ обеспечиваются за счет оптимального, основанного на характеристиках измеряемого сигнала, выбора (7). Целесообразно на каждой итерации цикла сдвигать границы временной выборки t_0 и t_k на n отсчетов — на ширину бегущего временного окна (рис. 1). В этом случае анализируемый интервал постоянен — $T = \text{const}$, и фильтр, можно так сказать, "забывает далекую историю", выделяя текущие особенности измеряемого сигнала.

3. Вычислительный эксперимент

В ходе исследований воспользовались известной математической моделью ЭЭГ мозга, представленной в работах [23, 24]. Модель позволяет полноценно воспроизвести ЭЭГ-подобные сигналы и имитировать в их составе различные нелинейные явления, отражающие как спонтанную низкочастотную активность организма, так и высокочастотную биоэлектрическую активность. Как известно, низкочастотные осцилляции — артефакты — маскируют интересующую исследователей высокочастотную биоэлектрическую активность [5, 7–9]. К высокочастотной активности отно-

сят физиологические ритмы "гамма" в диапазоне от 30 до 150 Гц и выше [5]. В ходе биомедицинских исследований часто необходимо в реальном времени наблюдения сигналов ЭЭГ выделять временные границы именно биоэлектрической активности гамма-ритмов.

Модель включала $J = 8$ каналов ЭЭГ. По каналам задавались разные сигналы, отличающиеся характеристиками высокочастотных шумовых составляющих. В одном-двух каналах из 8 моделировались инвертированные сигналы ЭЭГ. На рис. 2 представлены временные выборки характерных модельных ЭЭГ по четырём каналам измерений.

Искомая периодическая гамма-активность имитировалась в полосе частот [50; 200] Гц во всех восьми каналах с вариациями форм по каналам. Длительность паттернов выбиралась равной 150...250 мс и была синхронизирована с фазой "вдоха". На рис. 3 показаны примеры паттернов гамма-активности по двум каналам, а также их спектр. В целях увеличения неопределённости граничные значения расширенного частотного спектра задавались с существенной ошибкой — смещёнными относительно реального спектра модельных паттернов и равными $f_{\Pi}^H = 30$, $f_{\Pi}^B = 120$ Гц.

Моделировались гамма-ритмы с высокой и низкой амплитудой. Размах колебаний паттернов составлял при этом, соответственно, около 28 % и около 14 % от размаха колебаний фоновой ЭЭГ. Временная выборка, показанная на рис. 2, содержит пять участков гамма-активности, из которых 1 и 4 — участки с высокой интенсивностью гамма-активности, 2, 3, 5 — с низкой.

Ясно, что временные границы начала и окончания активности в области гамма-ритмов представлялись при моделировании "априорно неизвестными", а критериальная функция d_H (8) должна была наглядно отображать эти временные границы. График функции МХ d_H (8), рассчитанный на основе разработанного алгоритма (см. рис. 1), также показан

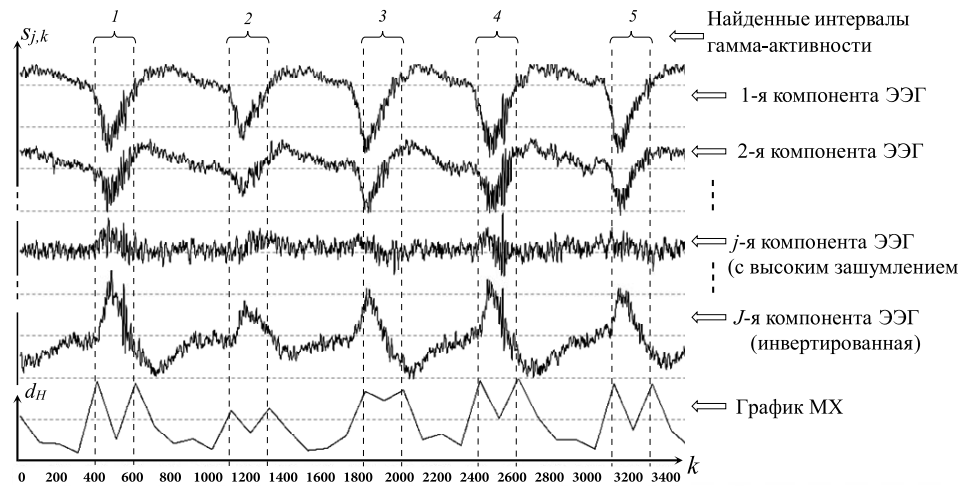


Рис. 2. Графики модельных ЭЭГ по четырём каналам и критериальной функции d_H (8)

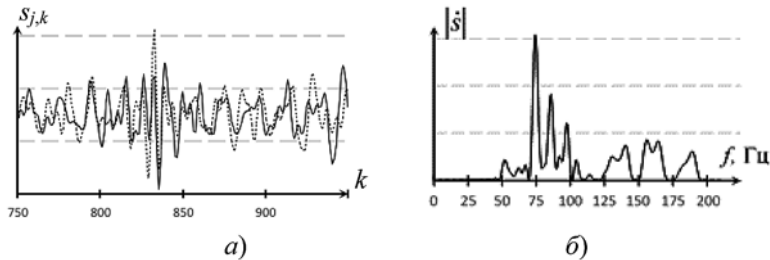


Рис. 3. Примеры гамма-ритмов по двум каналам (а) и спектр модельной гамма-активности (б)

на рис. 2. Из графика видно, что критериальная функция обеспечивает правильную локализацию по оси времени как паттернов гамма-активности высокой интенсивности, так и низкоамплитудных паттернов. Погрешности определения временных границ паттернов при этом не превышали половины скользящего временного окна $0,5n$, что составляло 50 мс.

Временная выборка, показанная на рис. 4, содержит два низкочастотных артефакта на интервалах [1700; 1900] и [2600; 4400] отсчетов (мс), а также четыре участка гамма-активности, из которых 1 и 3 — участки с высокой интенсивностью, 2 и 4 — с низкой.

Видно, что критериальная функция d_H (8) снова позволила правильно определить временные границы всех четырех интервалов активности в области физиологических ритмов "гамма".

Значения m_H , m_B оптимального диапазона M'_{opt} , определяемые из критерия (7), менялись в зависимости от наличия или отсутствия в ЭЭГ низкочастотных артефактов,

что свидетельствует об адаптивных свойствах синтезированного ПФ. Следует отметить, что минимальные значения самой критериальной функции (7) как при наличии, так и в отсутствие артефактов были практически постоянными и равны примерно 1,30.

В целях сравнительного анализа вместо синтезированного адаптивного фильтра в алгоритме был также использован ПФ Баттерворта 6-го порядка [15] с теми же "смещенными" частотами среза — $f_H^H = 30$ и $f_H^B = 120$ Гц. Критериальная функция (7) при отсутствии низкочастотных артефактов в этом случае была равна 1,34, что, как видно, хуже в сравнении с синтезированным ПФ на основе *MSSA*. На рис. 5 показаны графики функций $MX d_H$ (8) для временной выборки из рис. 2, рассчитанные после применения синтезированного ПФ на основе *MSSA* (сплошная линия на графике) и ПФ Баттерворта (пунктирная линия). Видно, что применение ПФ Баттерворта к исходному сигналу не обеспечивает требуемую для поиска гамма-активности чувстви-

тельность критериальной функции (8).

При наличии низкочастотных артефактов разница в значениях критериальной функции (7) существенно увеличивалась для исследуемых фильтров. Если для ПФ на основе *MSSA* она оставалась прежней — около 1,30, то для ПФ Баттерворта эта величина повышалась уже до значения 1,51. При задании, например, нижней частоты среза ПФ Баттерворта без ошибки равной $f_H^H = 50$ Гц значение критериальной функции (7) улучшалось и было равно 1,42. Из представленных результатов следует, что синтезированный ПФ действительно обладает свойством адаптации к изменениям параметров исходного сигнала в области низких частот и может быть реализован в реальном времени наблюдений ЭЭГ, в то время как ПФ на основе Баттерворта требует точной подстройки частот среза, без чего, ясно, адаптивностью не обладает.

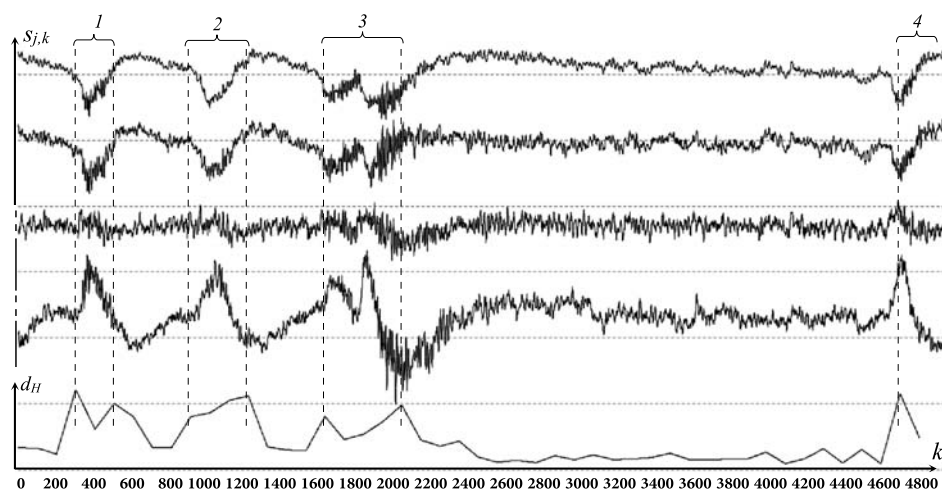


Рис. 4. Графики модельных ЭЭГ по четырем каналам при наличии низкочастотных артефактов, а также критериальной функции d_H (8)

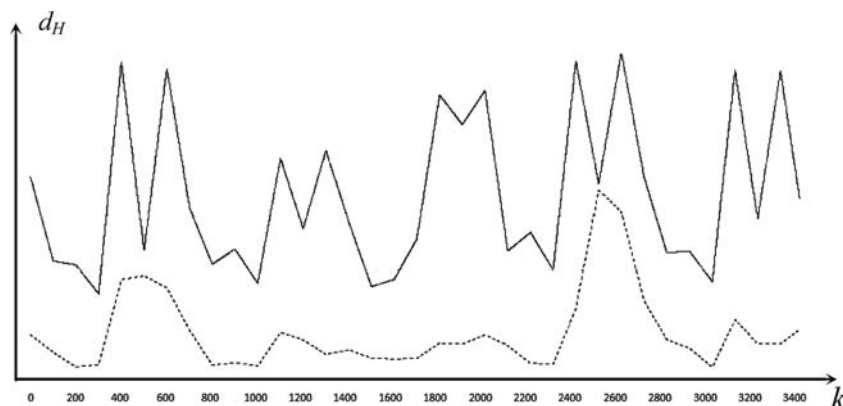


Рис. 5. Графики функций $MX d_H$ (8) при использовании синтезированного ПФ (сплошная линия) и ПФ Баттерворта (пунктирная линия)

Также следует отметить тот факт, что временные границы моделированной гамма-активности низкой интенсивности найти визуально в составе многомерной ЭЭГ принципиально невозможно.

Заключение

Разработанный ПФ на основе *MSSA* обладает свойством адаптивности к вариациям характеристик наблюдаемого многомерного сигнала и легко перестраивается в реальном времени. Его применение к исходному сигналу обеспечивает, в итоге, требуемую чувствительность критериальной функции поиска высокочастотных паттернов низкой интенсивности в составе зашумленных выходных сигналов многомерных динамических объектов. Это, в итоге, позволяет правильно найти положение по оси времени границ паттернов. И, окончательно, алгоритм, построенный на основе разработанного метода, реализуем в реальном времени измерений выходных сигналов многомерных динамических объектов.

Список литературы

1. Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование динамических систем (обзор) // Автоматика и телемеханика. 1980. № 8. С. 96—121.
2. Мисриханов А. М. Применение методов вейвлет-преобразования в электроэнергетике // Автоматика и телемеханика. 2006. № 5. С. 5—23.
3. Гнездицкий В. В. Обратная задача ЭЭГ и клиническая электроэнцефалография (картирование и локализация источников электрической активности мозга). М.: МЕД-пресс-информ, 2004. 624 с.
4. Basar E., Schurmann M., Demiralp T., Basar-Eroglu C., Ademoglu A. Event-related Oscillations are 'Real Brain Responses'—Wavelet-Analysis and New Strategies // Int. J. Psychophysiol. 2001. N. 39. P. 91—127.
5. Rangayyan R. M. Biomedical Signal Analysis: A Case-Study Approach. Wiley-IEEE Press, 2007. 440 p.
6. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
7. Щербань И. В., Кириленко Н. Е., Щербань О. Г. Эффективные критериальные функции спектральной энтропии для поиска высокочастотных паттернов в составе зашум-

ленных электрограмм // Информационно-управляющие системы. 2018. № 2. С. 8—17.

8. Щербань И. В., Кириленко Н. Е., Красников С. О. Метод временной локализации неизвестных высокочастотных осцилляторов в составе зашумленных сигналов на основе непрерывного вейвлет-преобразования // Автоматика и телемеханика. 2019. № 7. С. 122—133.

9. Горшков А. А., Осадчий А. Е., Фрадков А. Л. Регуляризация обратной задачи ЭЭГ/МЭГ локальным кортикальным волновым паттерном // Информационно-управляющие системы. 2017. № 5. С. 12—20.

10. Гуляев С. А., Архипенко И. В. Артефакты электроэнцефалографического исследования: их выявление и дифференциальный диагноз // Русский медицинский журнал. 2013. № 10. С. 486—491.

11. Elsner J. B., Tsonis A. A. Singular Spectrum Analysis: A New Tool in Time Series Analysis. New York and London: Plenum Press, 1996. 164 p.

12. Данилов Д. Л., Жигляевский А. А. Главные компоненты временных рядов: метод "Гусеница". СПб.: Пресском, 1997. 308 с.

13. Golyandina N., Nekrutkin V., Zhigljavsky A. Analysis of Time Series Structure: SSA and Related Techniques. London: Chapman&Hall/CRC, 2001. 305 p.

14. Golyandina N., Stepanov D. SSA-based approaches to analysis and forecast of multidimensional time series // Proc. 5th St. Petersburg Workshop on Simulation. St. Petersburg, Russian Federation, 2005. P. 293—298.

15. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983. 320 с.

16. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК Пресс, 2005. 305 с.

17. Hu H., Guo S., Liu R., Wang P. An adaptive singular spectrum analysis method for extracting brain rhythms of electroencephalography // PeerJ. 2017. N. 6, e3474.

18. Sanctis S., Malloni W. M., Kremer W., Tom'e A. M., Lang E. W., Neidig K. P., Kalbitzer H. R. Singular spectrum analysis for an automated solvent artifact removal and baseline correction of 1D NMR spectra // Journal of Magnetic Resonance. 2011. N. 210. P. 177—183.

19. Ghaderi F., Mohseni H. R., Sanei S. Localizing heart sounds in respiratory signals using singular spectrum analysis // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2011. N. 58. P. 3360—3367.

20. Maddirala A. K., Shaik R. A. Motion artifact removal from single channel electroencephalogram signals using singular spectrum analysis // Biomedical Signal Processing and Control. 2016. N. 30. P. 79—85.

21. Герман В., Пахомов А., Никитов С., Потапов А. Новейшие методы обработки изображений / Под ред. А. А. Потапова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.

22. Михайлов И. А. Распознавание изображений с помощью метода радиальных окрестностей // Компьютерная оптика. 2010. № 3. С. 399—407.

23. Bai O., Nakamura M., Ikeda A., Shibasaki H. Nonlinear Markov Process Amplitude EEG Model for Nonlinear Coupling Interaction of Spontaneous EEG // IEEE Transactions On Biomedicine Engineering. 2000. Vol. 47, N. 9. P. 1141—1146.

24. Bai O., Nakamura M., Nishida S., Ikeda A., Shibasaki H. Markov Process Amplitude EEG Model for Spontaneous Background Activity // Journal of Clinical Neurophysiology. 2001. N. 18(3). P. 283—290.

O. G. Shcherban, Assistant Professor, e-mail: shchero@mail.ru,

I. V. Shcherban, Professor, e-mail: shcheri@mail.ru,

Southern Federal University, Rostov-on-Don,

P. V. Lobzenko, Assistant Professor, e-mail: pasha.van@list.ru,

Moscow Technical University of Communications and Informatics

The Real-Time Method for the Temporal Localization of the High-Frequency Patterns in Noised Multichannel Signals

The problems of the real-time searching and temporal localization of the short-time patterns in the multichannel signals are important in many practical cases. The desired patterns can be masked by the high-frequency noise and low-frequency artifacts. The known approaches of the high precision searching for the low-intensity patterns can be used during an a posteriori analysis of the signals. The real-time method for the searching and temporal localization for the short-time low intensity patterns in multidimensional dynamic objects noised output signals has been considered. We synthesized an adaptive multichannel singular spectrum analysis (MSSA) band-pass filter (BPF). Based on the power spectral density of the signal amplitude the grouping rule determines adaptively the MSSA reconstructed components as low-frequency artifacts or high-frequency noise and removes them. The grouping rule thus enables BPF to be adaptive to the output signals containing different levels of the low-frequency artifacts or high-frequency noise. This provides the required sensitivity of the criterial function for the real-time searching and temporal localization for the low intensity patterns. The distance Hausdorff metric was used to measure the similarity of the two current neighboring non-overlapping time samples from the multichannel output signals. A computational experiment results illustrating the efficiency of the use of the method developed has been given. The eight channel electroencephalography (EEG) signal based on the Markov Process Amplitude EEG model were used to verify the developed method. Results showed a better performance in the real-time searching of the low intensity patterns, compared with the method, based on the Butterworth bandpass Fourier filter.

Keywords: real-time searching, short-time patterns, output signals, multidimensional dynamic objects, multichannel singular spectrum analysis, adaptive bandpass filter, the Hausdorff metric

DOI: 10.17587/it.26.507-514

References

1. Mironovskii L. A. Functional diagnosis of dynamic systems, *Avtomat. i Telemekh.*, 1980, no. 8, pp. 96–121 (in Russian).
2. Misrikhanov A. M. Wavelet Transform Methods: Application in Electroenergetics, *Autom. Remote Control*, 2006, vol. 67, no. 5, pp. 682–697.
3. Gnezdickij V. V. Reverse EEG challenge and clinical electroencephalography, Moscow, MEDpress-inform Publ., 2004, 624 p. (in Russian).
4. Basar E., Schurmann M., Demiralp T., Basar-Eroglu C., Ademoglu A. Event-related Oscillations are ‘Real Brain Responses’ — Wavelet-Analysis and New Strategies, *Int. J. Psychophysiol.*, 2001, no. 39, pp. 91–127.
5. Rangayyan R. M. Biomedical Signal Analysis: A Case-Study Approach, Wiley-IEEE Press, 2007, 440 p.
6. Krasovskij A. A. eds. The Theory Of Automatic Control, Moscow, Nauka, 1987, 720 p. (in Russian).
7. Shcherban I. V., Kirilenko N. E., Shcherban O. G. Effective cost functions for spectrum entropy to search for high-frequency event-related patterns in electrograms with noise, *Informatsionno-Upravliaiushchie Sistemy*, 2018, vol. 2018, no. 2, pp. 8–17 (in Russian).
8. Shcherban I. V., Kirilenko N. E., Krasnikov S. O. A Search Method for Unknown High-Frequency Oscillators in Noisy Signals Based on the Continuous Wavelet Transform, *Autom. Remote Control*, 2019, vol. 80, no. 7, pp. 1279–1287.
9. Gorshkov A. A., Osadchi A. E., Fradkov A. L. Regularization of EEG/MEG Inverse Problem with a Local Cortical Wave Pattern, *Informatsionno-Upravliaiushchie Sistemy*, 2017, no. 5, pp. 12–20 (in Russian).
10. Gulyaev S. A., Arhipenko I. V. Electroencephalographic investigation artifacts: their identification and differential diagnosis, *Russian Medical Journal*, 2013, no. 10, pp. 486–491 (in Russian).
11. Elsner J. B., Tsonis A. A. Singular Spectrum Analysis: A New Tool in Time Series Analysis, New York and London, Plenum Press, 1996, 164 p.
12. Danilov D. L., Zhiglyavskij A. A. Principal components of time series structure: SSA, St. Petersburg, Presskom Publ., 1997, 308 p. (in Russian).
13. Golyandina N., Nekrutkin V., Zhigljavsky A. Analysis of Time Series Structure: SSA and Related Techniques, London, Chapman&Hall/CRC, 2001, 305 p.
14. Golyandina N., Stepanov D. SSA-based approaches to analysis and forecast of multidimensional time series, *Proc. 5th St. Petersburg Workshop on Simulation*, St. Petersburg, Russian Federation, 2005, pp. 293–298 (in Russian).
15. Tihonov V. I. Optimal radio reception, Moscow, Radio and communication Publ., 1983, 320 p. (in Russian).
16. Smolencev N. K. Fundamentals of the theory of wavelets. Wavelets in MATLAB, Moscow, DMK Publ., 2005, 305 p. (in Russian).
17. Hu H., Guo S., Liu R., Wang P. An adaptive singular spectrum analysis method for extracting brain rhythms of electroencephalography, *PeerJ*, 2017, no. 6, e3474.
18. Sanctis S., Malloni W. M., Kremer W., Tomé A. M., Lang E. W., Neidig K. P., Kalbitzer H. R. Singular spectrum analysis for an automated solvent artifact removal and baseline correction of 1D NMR spectra, *Journal of Magnetic Resonance*, 2011, no. 210, pp. 177–183.
19. Ghaderi F., Mohseni H. R., Sanei S. Localizing heart sounds in respiratory signals using singular spectrum analysis, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2011, no. 58, pp. 3360–3367.
20. Maddiral A. K., Shaik R. A. Motion artifact removal from single channel electroencephalogram signals using singular spectrum analysis, *Biomedical Signal Processing and Control*, 2016, no. 30, pp. 79–85.
21. German V., Pahomov A., Nikitov S., Potapov A. The newest image processing techniques, Moscow, FIZMATLIT Publ., 2008, 496 p. (in Russian).
22. Mikhaylov I. A. Image recognition using a radial neighborhood method. *Computer Optics*, 2010, vol. 34, no. 3, pp. 399–407.
23. Bai O., Nakamura M., Ikeda A., Shibasaki H. Nonlinear Markov Process Amplitude EEG Model for Nonlinear Coupling Interaction of Spontaneous EEG, *IEEE Transactions On Biomedical Engineering*, 2000, vol. 47, no. 9, pp. 1141–1146.
24. Bai O., Nakamura M., Nishida S., Ikeda A., Shibasaki H. Markov Process Amplitude EEG Model for Spontaneous Background Activity, *Journal of Clinical Neurophysiology*, 2001, no. 18(3), pp. 283–290.

Н. Н. Яхно^{1, 2}, д-р мед. наук, проф., академик РАН, e-mail: info@ditc.ras.ru,

В. Н. Гридин¹, д-р техн. наук, проф., e-mail: info@ditc.ras.ru,

Д. С. Смирнов¹, канд. экон. наук, ст. науч. сотр., e-mail: info@ditc.ras.ru,

В. С. Панищев¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: info@ditc.ras.ru,

В. А. Парфенов², д-р мед. наук, проф., e-mail: info@ditc.ras.ru,

Т. М. Остроумова^{1, 2}, канд. мед. наук, мл. науч. сотр., e-mail: info@ditc.ras.ru,

Н. Н. Коберская^{1, 2}, канд. мед. наук, ст. науч. сотр., e-mail: info@ditc.ras.ru,

¹ ФГБУН Центр информационных технологий в проектировании РАН,

г. Одинцово Московской области,

² ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский университет), г. Москва

Статистическая обработка и методика сокращения размерности пространства данных пациентов при анализе когнитивных нарушений¹

Предложено развитие методов статистической обработки информации и алгоритмов преобразования и анализа медицинских данных пациентов в целях обнаружения факторов субъективного и легкого когнитивного снижения. Показывается неприменимость классических классификационных моделей для таких данных с низкой исходной согласованностью. Предлагается методика выявления групп показателей, обладающих наибольшей согласованностью и разделительной способностью для априорных групп пациентов. Преобразованные в соответствии с методикой данные могут являться исходными данными для построения эффективных предиктивных моделей регрессионного типа.

Ключевые слова: когнитивные нарушения, сокращение размерности пространства, многомерные статистические методы, логистическая регрессия, метод главных компонент

Введение

В настоящее время информационные технологии в медицине активно развиваются и позволяют улучшить эффективность работы здравоохранительных учреждений. Медицинские информационные системы должны обеспечивать обработку больших объемов разнородных данных, что требует развития и использования новых современных методов.

Одной из проблем, связанных с обработкой данных в медицине, полученных от разных источников, является их несогласованность. Наиболее известные алгоритмы оценки и устранения несогласованности — алгоритмы DerSimonian-Laird [1] и Mandel-Paule [2] и их модификации [3—5] — предполагают нормальность

распределений погрешностей и проведение параметрических тестов, связанных с этим типом распределения. Это делает не всегда возможным их использование и, в частности, не позволяет применять эти методы для обработки данных медицинских исследований, не подчиняющихся известным теоретическим распределениям.

В настоящем исследовании понятие согласованности данных сформулировано на основе работ ИГМ СО РАН [6]. Пусть существует множество объектов $S = \{S_1, \dots, S_m\}$ и набор функций $X = \{X_1, \dots, X_n\}$, определенных на множестве S и принимающих количественные значения. Также имеется набор источников данных $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_p\}$ о значениях функции. Значения функции X_j , полученные на объектах $S_1, \dots, S_m$ от источника θ_p , обозначены как $X_j(S_1, \dots, S_m)_p$. Данными называют совокупность подмножества объектов $\hat{S} \subset S$, подмножества функций $\hat{X} \subset X$ и их полученные значения от набора источников $\hat{\theta} \subset \theta$, которые могут быть объединены в кортежи вида

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-29-01112 мк.

$$\langle X_j | \hat{S} = \{S_{i(1)}, \dots, S_{i(k)}\} \| X_j(S_{i(1)}, \dots, S_{i(k)}) \|_p \rangle.$$

Данные считают слабо согласованными, если в них присутствуют такие кортежи, что для двух источников $\theta_p, \theta_q \in \hat{\Theta}$, представления ими значений функции X_j на объектах $\hat{S}$ отличаются не менее чем на определенную величину δ_j :

$$\|X_j(S_{i(1)}, \dots, S_{i(k)})\|_p - \|X_j(S_{i(1)}, \dots, S_{i(k)})\|_q > \delta_j.$$

Данные являются плохо согласованными, если в них присутствуют такие кортежи, что для двух источников $\theta_p, \theta_q \in \hat{\Theta}$, представления ими значений функции X_j на объектах $\hat{S}$ отличаются не менее чем на определенную величину $\varepsilon_j > \delta_j$:

$$\|X_j(S_{i(1)}, \dots, S_{i(k)})\|_p - \|X_j(S_{i(1)}, \dots, S_{i(k)})\|_q > \varepsilon_j.$$

Величины δ_j, ε_j выбираются из содержательных соображений и зависят от проблемной области.

Одной из сложных и нерешенных задач является статистический анализ разнородных данных, получаемых при анализе когнитивного состояния пациента. Для решения данной задачи в настоящей работе предлагается доработать известный метод [6], который в первоначальном виде не применим для анализа данных о когнитивном состоянии вследствие невозможности однозначного определения набора функций и источников. Рассмотрим разработанный метод обработки данных пациентов в целях обнаружения факторов, влияющих на когнитивные нарушения.

Когнитивные нарушения по степени тяжести подразделяют на тяжелые (деменция) и додементные когнитивные расстройства. Внутри последних выделяют умеренные когнитивные нарушения (КН), а также легкое и субъективное когнитивное снижение [7]. Пациенты с субъективным когнитивным снижением (СКС) имеют жалобы когнитивного характера (например, на забывчивость, ухудшение концентрации внимания и памяти и др.) в отсутствие объективных признаков когнитивных нарушений. Под легким когнитивным снижением (ЛКС) подразумевают наличие у больного жалоб, в то время как результаты расширенного нейропсихологического тестирования не выявляют отклонений от возрастной нормы, достигающих степени умеренных когнитивных расстройств [7]. СКС и ЛКС представляют собой наиболее раннее проявление когнитивного снижения и повышают как риск, так и скорость развития деменции в дальнейшем [8].

Неотъемлемой и важной задачей является развитие методов эффективного преобразования статистических данных о состоянии па-

циентов для ответа на две группы вопросов: какие физиологические характеристики наибольшим образом влияют на риск развития когнитивных нарушений и какие характеристики следует использовать для объективного разделения пациентов с жалобами когнитивного характера на подгруппы с СКС и ЛКС. Для решения данной задачи разработана методика применения методов статистической обработки данных с использованием современных информационных средств и технологий при выделении наиболее информационных критериев для исходных данных. Применяемые в работе методы комбинаторного анализа для бинарных априорных групп позволили добиться значительного уменьшения влияния несогласованности значений нейропсихологических тестов в разных группах, что характерно для первичных разнородных данных.

1. Постановка задачи.

Описание исходных данных

Рассмотрим следующую математическую постановку задачи. Пусть $S = \{S_1, \dots, S_m\}$ — выборка пациентов, а $X = \{X_1, \dots, X_n\}$ — множество функций, характеризующих процессы когнитивного нарушения. Сложность рассматриваемой проблемной области заключается в том, что набор таких функций и их определение на множестве S заранее не известно. Однако известен набор нейропсихологических тестов $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_p\}$, которые исполняют роль источников данных о значениях набора функций $\tilde{X} \subset X$ для пациентов, состав которых частично и, нередко лишь на качественном уровне, известен. Обозначим $\|S_1, \dots, S_m | \tilde{X}_p\|_p$ — набор результатов теста θ_p для выборки пациентов $S_1, \dots, S_m$, являющихся оценкой некоего частично известного набора процессов когнитивного снижения. Таким образом, мы можем говорить о данных как о наборе кортежей следующего вида:

$$\langle \theta_p | S = \{S_1, \dots, S_m\} \| S_1, \dots, S_m | \tilde{X}_p \|_p \rangle.$$

Тогда слабо согласованные данные можно определить как данные, где для двух тестов θ_p и θ_q выполняется следующее неравенство:

$$\sum_{i=1}^m |\Psi_{pq}(\|S_i | \tilde{X}_p\|_p) - \Psi_{qp}(\|S_i | \tilde{X}_q\|_q)| > \delta_j,$$

где Ψ_{pq} и Ψ_{qp} — нормировочные функции перевода для сопоставления тестов. Стоит отметить, что выбор нормировочных функций также является отдельной задачей и может повлиять на точность решения. В качестве простейшего варианта использована ранговая

характеристика значения теста и осуществлен переход к оценке несогласованности через ранговые коэффициенты корреляции, или ранговые коэффициенты конкордации Кенделла, для всего набора тестов.

Введем оценку несогласованности относительно априорных групп. Введем функцию A_p , принимающую значения $\{1,2,3\}$, которая показывает на основании теста θ_p , к какой из трех групп относится пациент — группе контроля, группе с субъективными когнитивными нарушениями или группе с легким когнитивными нарушениями. Тогда меру несогласованности можно рассчитать как

$$D = 2C_p^2 - \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^P \left(\frac{\#\{S|A_p(\|S|\tilde{X}_p\|_p) = 1 \& A_q(\|S|\tilde{X}_q\|_q) = 1\}}{\#\{S_1, \dots, S_m\}} + \frac{\#\{S|A_p(\|S|\tilde{X}_p\|_p) = 2 \& A_q(\|S|\tilde{X}_q\|_q) = 2\}}{\#\{S_1, \dots, S_m\}} + \frac{\#\{S|A_p(\|S|\tilde{X}_p\|_p) = 3 \& A_q(\|S|\tilde{X}_q\|_q) = 3\}}{\#\{S_1, \dots, S_m\}} \right), p \neq q,$$

где # — мощность соответствующего множества.

С учетом того, что тесты θ являются интегральными характеристиками, каждый из которых оценивает множество процессов, влияющих на когнитивное смещение, несогласованность данных говорит об отсутствии набора доминантных процессов, общих для большинства пациентов, или о невозможности такие процессы выявить. В то же время, существующие исследования позволяют говорить о наличии влияния физиологических параметров на когнитивное состояние. Например, в работах [9—11] показано, что одним из самых главных факторов риска развития когнитивного снижения является артериальная гипертензия (АГ). Соответственно, необходимо перейти к такому формату данных, где несогласованность данных не будет помехой для нахождения статистически значимой взаимосвязи между доминантными когнитивными и физиологическими процессами.

Стоит отметить, что в контексте решаемой задачи и трактовки наличия несогласованности в данных разница между слабо согласованными данными и плохо согласованными данными несущественна.

В исследование были последовательно включены 102 пациента с АГ (средний возраст $51,2 \pm 5,7$ лет, 56 женщин, 46 мужчин) в возрасте от 40 до 59 лет на момент включения в исследование и 50 практически здоровых людей (средний возраст $47,3 \pm 5,2$ лет, 33 женщины,

17 мужчин) с нормальным уровнем артериального давления (АД) (контрольная группа). Пациенты с АГ были дополнительно разделены на две подгруппы: пациенты с СКС (средний возраст $52,3 \pm 5,1$ лет, 27 женщин и 10 мужчин) и ЛКС (средний возраст $50,6 \pm 5,9$ лет, 29 женщин и 36 мужчин).

Когнитивные функции оценивались с помощью теста "10 слов" [12], Монреальской шкалы оценки когнитивных функций (MoCA) [13, 14], частей А и В теста построения маршрута (Trail making test, TMT) [15], теста Струпа [16], теста вербальных ассоциаций (литеральные и категориальные ассоциации) [17].

Для проведения статистических расчетов использовали программное обеспечение R версии 3.6.1 (2019-07-05) и графическую среду RStudio.

2. Методы решения.

Статистический анализ исходных данных

На первом этапе рассматривались различия между контрольной группой и группой с пациентами с АГ. В табл. 1 представлены нейро-

Таблица 1

Значимо различающиеся признаки и степени их различия и вариация

Нейropsychологический тест	Относительная разница средних	Относительная разница медиан	Коэффициент вариации, контрольная группа	Коэффициент вариации, пациенты с АГ
TMT.B -TMT.A	41,80 %	47,75 %	34,92 %	50,85 %
Тест Струпа, коэффициент интерференции T3—T2*	27,25 %	15,22 %	48,36 %	67,96 %
TMT.B	23,01 %	19,17 %	25,55 %	36,94 %
Литеральные ассоциации	−18,22 %	−18,52 %	20,10 %	31,14 %
Тест Струпа, T3	17,01 %	5,71 %	27,72 %	37,52 %
Тест Струпа, T1	11,45 %	9,47 %	14,67 %	15,25 %
Категориальные ассоциации	−11,42 %	−6,67 %	23,26 %	37,32 %
Тест "10 слов". Отсроченное воспроизведение	9,94 %	27,27 %	30,57 %	25,08 %
Тест Струпа, T2	8,71 %	10,92 %	18,66 %	19,03 %
TMT.A	−4,36 %	−6,33 %	32,17 %	34,74 %
Тест MoCA	−2,37 %	0,00 %	5,71 %	5,23 %
Тест "10 слов". Непосредственное воспроизведение	−2,06 %	0,00 %	16,89 %	24,90 %
T3—T2 — разность затраченного времени на выполнение частей 2 и 3 теста Струпа				

психологические тесты, обладающие значимыми различиями, отсортированные в порядке убывания относительной разницы средних по группе контроля и группе пациентов с АГ. Для оценки значимости использовался тест Манна — Уитни, так как большая часть параметров не распределена по нормальному закону. Также в табл. 1 представлена относительная разница между медианами и коэффициенты вариации каждой из групп пациентов.

При анализе результатов нейропсихологического тестирования статистически значимо различались (прошли тест Манна—Уитни с достоверностью $p\text{-value} < 0,05$) только разница между временем выполнения частей В и А ТМТ и средний балл по тесту МоСА. Корреляционный анализ (рассчитывались как линейные коэффициенты корреляции Пирсона, так и ранговые коэффициенты Спирмена и Кенделла) показал отсутствие значимой статистической связи между любыми парами признаков. Также был рассчитан коэффициент конкордации Кенделла для всех шкал, использовавшихся для оценки когнитивных функций, дающий характеристику согласованности. Полученное значение составляет $W = 0,1233$ при $p\text{-value} = 0,0001159$, что говорит о низкой согласованности в структуре исходного пространства.

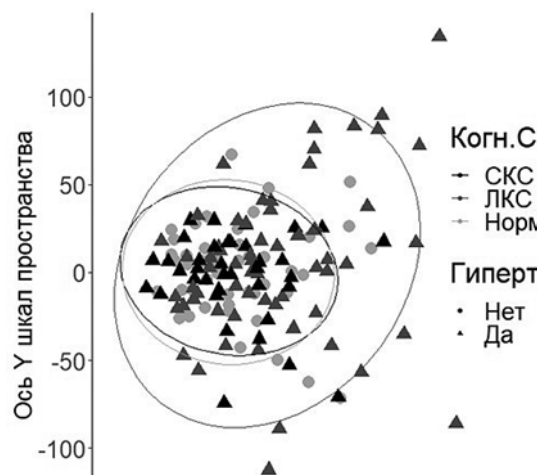


Рис. 1. Визуализация исходного пространства

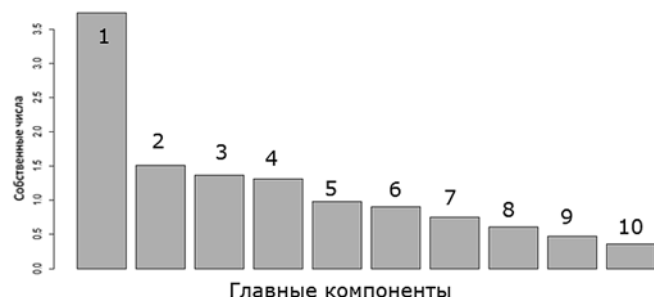


Рис. 2. Собственные числа главных компонент исходного пространства

На рис. 1 представлена визуализация исходного пространства с использованием метрического многомерного шкалирования в евклидовом пространстве [18]. Также данные были подвергнуты процедуре стандартизации.

На рис. 1 представлены разными цветами и формами маркеров пациенты, относящиеся к разным группам. Треугольными маркерами отмечены пациенты с АГ, круглыми — пациенты из группы контроля. Пациенты группы контроля также отмечены светлым цветом, темный цвет треугольного маркера соответствует пациентам с СКС, более светлый — с ЛКС. Из графика следует, что в исходном пространстве фактически отсутствует возможность алгоритмического разделения пациентов по группам по тяжести когнитивных нарушений.

Предположение о плохой согласованности данных в исходном виде подтверждается и результатами компонентного анализа. Использован метод главных компонент, являющийся эффективным для сокращения размерности пространства путем преобразования данных в новой системе координат, где каждая координата (компонента) максимизирует остаточную выборочную дисперсию. Так, исходя из анализа собственных чисел главных компонент (рис. 2) можно сделать вывод о том, что первые две главные компоненты объясняют меньше 50 % вариации исходного пространства, что говорит о несогласованности исходных данных и требует их преобразования в новое пространство за счет сокращения набора исходных признаков.

Кроме того, все факторные нагрузки 1-й и 2-й главных компонент меньше по модулю 0,5, что говорит об их слабой связанности с исходными признаками пространства, а следовательно, о некой "бессистемности" распределения результатов оценки когнитивных функций.

Следовательно, необходимо преобразование исходных данных для поиска устойчивых комбинаций признаков, пригодных для алгоритмического разделения априорных групп пациентов. В рамках текущего пространства использование предиктивных алгоритмов будет неэффективным в силу, во первых, сильного переобучения при использовании в качестве зависимой переменной бинарных характеристик о принадлежности пациента к определенной группе, во вторых, отсутствия явных однофакторных зависимостей между признаками принадлежащих к разным группам, в третьих, существенно более сильного разделения пациентов на группы с АГ и контрольную, нежели на группы с наличием когнитивных нарушений и без него.

3. Описание алгоритма модификации исходного пространства данных

Для решения задачи по поиску оптимальных нейropsychологических шкал, позволяющих разделить группу пациентов с АГ на подгруппы пациентов с СКС и ЛКС, рассматривался вариант свертки исходного пространства и перехода к одному обобщенному признаку.

Для поиска подобного обобщающего показателя были исследованы все возможные комбинации психоневрологических параметров с использованием логистической регрессии (логит-модели) [19] для наилучшего решения следующих двух задач:

- разделение группы контроля и пациентов с когнитивными нарушениями;
- выделение внутри пациентов с КН групп с СКС и ЛКС.

Для каждого набора параметров проводили 1000 испытаний с варьированием пациентов между обучающей выборкой и тестовой выборкой. Выборки были разбиты по Парето в пропорции 80/20.

Для каждой модели анализировали следующие критерии валидации:

- коэффициент детерминации МакФаддена ($R^2_{McFadden}$) [20];
- информационный критерий Акаике (AIC) [21];
- число угаданных на тестовых выборках значений.

Для всех вариантов ресемплирования рассчитывались средние значения критериев верификации (медиана в случае числа угаданных).

По каждому критерию валидации отбирали 15 наилучших комбинаций оцениваемых когнитивных тестов. Среди всех комбинаций были отобраны те, что чаще всего попадали в 15 лучших по шести валидационным критериям. Также было рассчитана частота попаданий отдельного признака в наилучшие комбинации.

На основании этих результатов далее были исследованы четыре комбинации признаков. Вошедшие в каждую комбинацию признаки отмечены светлым цветом в табл. 2

Далее представлены результаты анализа по четвертой комбинации как оказавшейся наилучшей.

4. Компонентный анализ сокращенного пространства

На рис. 3 представлена визуализация пространства признаков, принадлежащих к четвертой комбинации признаков с использованием многомерного шкалирования. Цветовые обозначения и значения маркеров идентичны рис. 1.

Таблица 2

Когнитивные признаки используемые для дальнейшего анализа в разных комбинациях

Тест	Комбинация 1	Комбинация 2	Комбинация 3	Комбинация 4
TMT A (с)	FALSE	TRUE	TRUE	FALSE
TMT B (с)	FALSE	TRUE	FALSE	TRUE
TMT B-TMT A (с)	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE
MoCA тест (баллы)	FALSE	TRUE	TRUE	FALSE
Литеральные ассоциации (число слов)	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Категориальные ассоциации (число слов)	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Тест Струпа — T1 (с)	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE
Тест Струпа — T2 (с)	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Тест Струпа — T3 (с)	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Тест Струпа — Коэффициент интерференции (T3—T2)*	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Тест "10 слов", непосредственное воспроизведение (число слов)	FALSE	TRUE	TRUE	FALSE
Тест "10 слов", отсроченное воспроизведение (число слов)	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE

* T3—T2 — разность затраченного времени на выполнение частей 2 и 3 теста Струпа

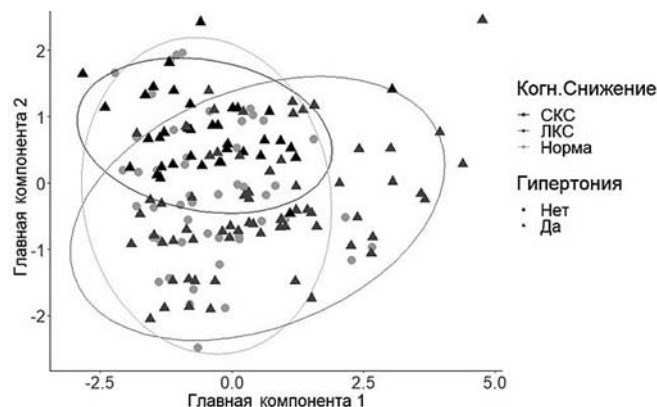


Рис. 3. Визуализация нового пространства

Из графика видно, что априорные группы стали разнесены в пространстве значительно лучше, нежели на рис. 1, хотя общее качество разделения не идеально. Для данного пространства коэффициент конкордации Кенделла составил $W = 0,4107$ при $p\text{-value} = 1,069 \cdot 10^{-06}$, таким образом удалось в несколько раз увеличить согласованность данных. Забегая вперед, отметим, что визуализация методом главных компонент будет полностью совпадать с многомерным шкалированием. В целом группа

Таблица 3
Факторные нагрузки главных компонент нового пространства

Тест	Главная компонента 1	Главная компонента 2	Главная компонента 3	Главная компонента 4
TMT В (с)	0,661		0,263	0,703
TMT В-TMT А (с)	0,664		0,222	-0,709
Тест Струпа — Т1 (с)	0,33	0,146	-0,932	
Тест "10 слов", отсроченное воспроизведение (число слов)	-0,117	0,985	0,114	

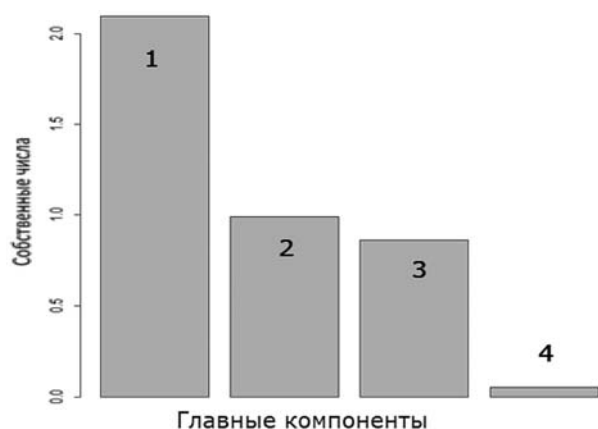


Рис. 4. Собственные числа главных компонент нового пространства

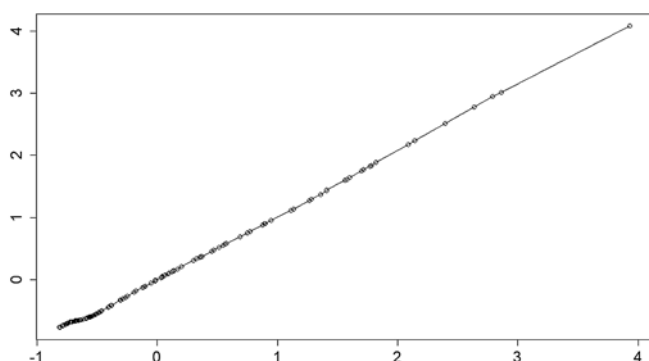


Рис. 5. Главная кривая нового пространства

контроля и пациенты с СКС обладают более низкими значениями по 1-й главной компоненте, в то время как пациенты с СКС визуально явно отличаются от пациентов с ЛКС по значениям 2-й компоненты.

Компонентный анализ показывает лучшую согласованность данных нового пространства как с точки зрения *собственных чисел* (рис. 4), так и с точки зрения *факторных нагрузок* (см. табл. 3, где приведены значения только значимых нагрузок).

Стоит отметить, что первая компонента (разделяющая группу контроля и СКС от ЛКС) имеет большую связанность с тестами связи цифр и букв, в то время как 2-я компонента, лучше отделяющая группу с субъективными нарушениями от группы с легкими нарушениями, связана с тестом "10 слов".

Также для проверки возможностей нелинейного разложения пространства данных был применен метод главной кривой, который заключается в нахождении гладкой кривой, которая проходит через середину данных в ортогональном смысле. Эта кривая является непараметрическим обобщением линейного метода главных компонент и характеризует основной характер зависимости [22]. В нашем случае видно (рис. 5), что кривая, по сути, линейна, что говорит об отсутствии значимой нелинейной связи в новом пространстве. Соответственно, можно использовать полученные ранее главные компоненты для дальнейшего анализа.

5. Дискриминантный анализ в новом пространстве

Была исследована возможность применять полученные главные компоненты для предиктивных и регрессионных моделей. Был применен стандартный метод MANOVA [23] и непараметрический тест Краскела— Уоллиса [24] для проверки гипотезы о способности полученных главных компонент эффективно разделять пациентов по априорным группам.

Таблица 4

Результаты многомерного дисперсионного анализа

Главные компоненты		Число степеней свободы	Сумма квадратов ошибки	Средняя ошибка	Значение F-критерия	P-value
1-я главная компонента	Группа пациентов	2	40,308	20,1539	10,796	4,18·10 ⁻⁵
	Остатки	149	278,14	1,8667		
2-я главная компонента	Группа пациентов	2	29,499	14,7496	18,203	8,46·10 ⁻⁸
	Остатки	149	120,732	0,8103		

Результаты многомерного теста (табл. 4) являются значимыми, соответственно, можем предположить, что найденные компоненты являются эффективными с точки зрения разделения групп пациентов.

Метод MANOVA применяется только для нормально распределенных данных, однако применение теста Шапиро—Уилкса показало, что нормально распределена только 1-я компонента. Поэтому для уточнения результатов анализа был проведен тест Краскела—Уоллиса. Для 1-й компоненты было получено значение критерия $\chi^2 = 16,26$ при $p\text{-value} = 0,0002945$, для 1-й компоненты было получено значение критерия $\chi^2 = 33,248$ при $p\text{-value} = 6,031 \cdot 10^{-8}$, что подтверждает выводы по методу MANOVA.

Заключение

Поиск и обнаружение факторов, способных влиять на когнитивные нарушения на ранних этапах их проявления, являются важной статистической и алгоритмической медицинской и социальной задачей. Однако в силу сложности этих процессов классические методы регрессионо-корреляционного анализа оказываются неприменимы. Более того, как показывает данное исследование, выбор в качестве зависимых переменных априорных принадлежностей к той или иной группе не позволит связать физиологические отклонения с когнитивными расстройствами. Использование свертки пространства результатов нейропсихологического тестирования пациентов для перехода к интегральным характеристикам применяется в предикторных и регрессионных моделях как отклик системы.

Предложенная в статье методика с применением современных инструментальных средств для обработки статистических данных, таких как язык R, позволяет в несколько раз повысить согласованность итогового пространства интегральных характеристик. Также было показано, что полученные главные компоненты обладают статистической связью с пространством физиологических показателей силой, и эта методика может быть применима и для аналогичных исследований, связанных с разнородностью и сложными правилами группировки исходных количественных данных.

Информационная система поддержки принятия решений врачом, построенная на базе созданной методики, выявленных факторов и разработанных алгоритмов, может найти широкое применение в практике медицинских учреждений при диагностики когнитивных нарушений.

Список литературы

1. DerSimonian R., Kacker R. Random-effects model for meta-analysis of clinical trials: An update // *Contemporary Clinical Trials*. 2007. Vol. 28, Iss. 2. P. 105–114.
2. Paule R. C., Mandel J. Consensus values and weighting factors // *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 1982. Vol. 87 (5). P. 377–385.
3. Lee K. J., Thompson S. G. Flexible parametric models for random-effects distributions // *Statistics in Medicine*. 2008. Vol. 27 (3). P. 418–434.
4. Baker R., Jackson D. A new approach to outliers in meta-analysis // *Health Care Management Science*. 2008. Vol. 11 (2). P. 121–131.
5. Аронов П. М. Оценка согласованного значения результатов межлабораторных измерений с минимальным увеличением их неопределенности // *Стандартные образцы*. 2019. № 4.
6. Красавчиков В. О. Математические методы, алгоритмы и технология геомоделирования для решения задач геологии нефти и газа. Автореф. дис. ... док. техн. наук. Кемерово, 2007. 39 с.
7. Яхно, Н. Н., Захаров В. В., Коберская Н. Н., Мхитарян Э. А., Гришина Д. А., Локшина А. Б., Савушкина И. Ю., Посохов С. И. "Предумеренные" (субъективные и легкие) когнитивные расстройства // *Неврологический журнал*. 2017. Т. 22, № 4. С. 198–204.
8. Reisberg B., Shulman M. B., Torossian C., Leng L., Zhu W. Outcome over seven years of healthy adults with and without subjective cognitive impairment // *Alzheimers Dement*. 2010. Vol. 6. P. 11–24.
9. Чазова И. Е. и др. Клинические рекомендации. Диагностика и лечение артериальной гипертензии // *Кардиологический вестник*. 2015. № 1. С. 3–30.
10. Парфенов В. А., Остроумова Т. М., Перепелова Е. М., Перепелов В. А., Кочетков А. И., Остроумова О. Д. Перфузия головного мозга, когнитивные функции и сосудистый возраст у пациентов среднего возраста с эссенциальной артериальной гипертензией // *Кардиология*. 2018. Т. 58, № 5. С. 23–31.
11. Остроумова Т. М., Парфенов В. А., Остроумова О. Д., Перепелова Е. М., Перепелов В. А., Борисова Е. В. Возможности метода бесконтрастной магнитно-резонансной перфузии для выявления раннего поражения головного мозга при эссенциальной артериальной гипертензии // *Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика*. 2018. Т. 10, № 1. С. 17–23.
12. Лурья А. Р. Заучивание 10 слов // *Альманах психологических тестов*. 1995. С. 92–94.
13. Nasreddine Z. S. et al. The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: A Brief Screening Tool For Mild Cognitive Impairment // *Journal of the American Geriatrics Society*. 2005. Vol. 53 (4).
14. Nasreddine Z. S. MoCA Russian version, 2010. Available from: http://www.mocatest.org/wp-content/uploads/2015/testsinstructions/MoCA-Test-Russian_2010.Pdf
15. Reitan R. Validity of the Trail Making Test as an indicator of organic brain damage // *Percept Mot Skills*. 1958. Vol. 8. P. 271–276.
16. MacLeod C. M. Half a century of research on the Stroop effect: An integrative review // *Psychol Bull*. 1991. Vol. 109, N. 2. P. 163–203.
17. Парфенов В. А., Захаров В. В., Преображенская И. С. Когнитивные расстройства. М.: Ремедиум, 2014. 192 с.
18. Mardia K. V. Some properties of classical multidimensional scaling. *Communications on Statistics // Theory and Methods*. Vol. 7. P. 1233–1241. doi: 10.1080/03610927808827707.
19. Магнус Я. Р., Катышев П. К., Пересецкий А. А. М13 Эконометрика. Начальный курс: Учеб. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Дело, 2004. 576 с.
20. Greene W. H. *Econometric Analysis*. Prentice Hall, Upper Saddle River, 2003.
21. Akaike H. A new look at the statistical model identification // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1974. Vol. 19. P. 716–723.
22. Hastie T., Stuetzle W. Principal Curves // *JASA*. Jun., 1989. Vol. 84, N. 406. P. 502–516.
23. Krzanowski W. J. *Principles of Multivariate Analysis. A User's Perspective*. Oxford, 1988.
24. Hollander M., Wolfe D. A. *Nonparametric Statistical Methods*. New York: John Wiley & Sons, 1973. P. 115–120.

N. N. Yakhno^{1, 2}, Professor, e-mail: info@ditc.ras.ru, V. N. Gridin¹, Professor, e-mail: info@ditc.ras.ru,
D. S. Smirnof¹, Senior Researcher, e-mail: info@ditc.ras.ru,
V. S. Panishchev¹, Senior Researcher, e-mail: info@ditc.ras.ru,
V. A. Parfenov², Professor, e-mail: info@ditc.ras.ru,
T. M. Ostroumova^{1, 2}, Junior Researcher, e-mail: info@ditc.ras.ru,
N. N. Koberskaya^{1, 2}, Senior Researcher, e-mail: info@ditc.ras.ru,

¹ Design Information Technologies Center Russian Academy of Sciences,
Odintsovo, Moscow Region, Russian Federation

² I. M. Sechenov First Medical State University, Moscow

Statistical Processing and Methods for Reducing the Dimension of Space on the Example of Data for Patients in the Analysis of Cognitive Impairment

The article proposes the development of methods for statistical processing of information and algorithms for converting and analyzing medical data of patients in order to detect factors of subjective and easy cognitive decline. The inapplicability of classical classification models for such data with a low initial consistency is shown. A technique is proposed for identifying groups of indicators that have the greatest consistency and dividing ability for a priori groups of patients. The data transformed in accordance with the methodology can be the initial data for constructing effective predictive models of the regression type.

Keywords: cognitive decline, spatial dimensionality reduction, multidimensional statistical methods, logistic regression, principal component analysis

Acknowledgements: The reported study was funded by RFBR, project number № 19-29-01112 mk

DOI: 10.17587/it.26.515-522

References

1. DerSimonian R., Kacker R. Random-effects model for meta-analysis of clinical trials: An update, *Contemporary Clinical Trials*, 2007, vol. 28, iss. 2, pp. 105–114.
2. Paule R. C., Mandel, J. Consensus values and weighting factors, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1982, vol. 87 (5), pp. 377–385.
3. Lee K. J., Thompson S. G. Flexible parametric models for random-effects distributions, *Statistics in Medicine*, 2008, vol. 27 (3), pp. 418–434.
4. Baker R., Jackson D. A new approach to outliers in meta-analysis, *Health Care Management Science*, 2008, vol. 11 (2), pp. 121–131.
5. Aronov P. M. Estimation of the agreed value of the results of inter-laboratory measurements with a minimum increase in their uncertainty, *Standard Samples*, 2019, no. 4 (in Russian).
6. Krasavchikov V. O. Mathematical methods, algorithms and geomodelling technology for solving problems of oil and gas geology, Abstract of a dissertation of a doctor of technical science, Kemerovo, 2007, 39 p. (in Russian).
7. Yakhno N. N., Zakharov V. V., Koberskaya N. N., Mkhitarian E. A., Grishina D. A., Lokshina A. B., Savushkina I. Yu., Posokhov S. I. Premeditated (subjective and mild) cognitive, *Neurological Journal*, 2017, vol. 22, no. 4, pp. 198–204 (in Russian).
8. Reisberg B., Shulman M. B., Torossian C., Leng L., Zhu W. Outcome over seven years of healthy adults with and without subjective cognitive impairment, *Alzheimers Dement.*, 2010, vol. 6, pp. 11–24.
9. Chazova I. E. et al. Clinical recommendations. Diagnosis and treatment of arterial hypertension, *Cardiological Bulletin*, 2015, no. 1, pp. 3–30 (in Russian).
10. Parfenov V. A., Ostroumova T. M., Perepelova Ye. M., Perepelov V. A., Kochetkov A. I., Ostroumova O. D. Brain perfusion, cognitive functions and vascular age in middle-aged patients with essential arterial hypertension, *Cardiology*, 2018, vol. 58, no. 5, pp. 23–31 (in Russian).
11. Ostroumova T. M., Parfenov V. A., Ostroumova O. D., Perepelova Ye. M., Perepelov V. A., Borisova Ye. V. Possibilities of the method of non-contrast magnetic resonance perfusion for detecting early brain damage in case of essential arterial hypertension, *Neurology, Neuropsychiatry, Psychosomatics*, 2018, vol. 10, no. 1, pp. 17–23 (in Russian).
12. Luria A. R. Memorization of 10 words, *Almanac of Psychological Tests*, 1995, pp. 92–94 (in Russian).
13. Nasreddine Z. S., et al. The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: A Brief Screening Tool For Mild Cognitive Impairment, *Journal of the American Geriatrics Society*, 2005, vol. 53 (4).
14. Nasreddine Z. S. MoCA Russian version, 2010, available at: http://www.mocatest.org/wp-content/uploads/2015/testsinstructions/MoCA-Test-Russian_2010.pdf.
15. Reitan R. Validity of the Trail Making Test as an indicator of organic brain damage, *Percept Mot Skills*, 1958; 8:271–276.
16. MacLeod C. M. Half a century of research on the Stroop effect: An integrative review, *Psychol Bull* 1991; 109 (2): 163–203.
17. Parfenov V. A., Zakharov V. V., Preobrazhenskaya I. S. Cognitive disorders. Moscow, Remedium, 2014, 192 p. (in Russian).
18. Mardia K. V. Some properties of classical multidimensional scaling, *Communications on Statistics Theory and Methods*, vol. 7, pp. 1233–1241. doi: 10.1080/03610927808827707.
19. Magnus Ya. R., Katyshev P. K., Peresetskiy A. A. M13 Econometrics. Initial course: Textbook, Moscow, Business, 2004, 576 p. (in Russian).
20. Greene W. H. Econometric Analysis. 5th Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2003.
21. Akaike H. A new look at the statistical model identification, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, vol. 19, pp. 716–723.
22. Hastie T., Stuetzle W. Principal Curves, *JASA*, 1989, vol. 84, no. 406, pp. 502–516.
23. Krzanowski W. J. Principles of Multivariate Analysis. A User's Perspective, Oxford, 1988.
24. Hollander M., Wolfe D. A. Nonparametric Statistical Methods, New York, John Wiley & Sons, 1973, pp. 115–120.

А. С. Круглик, магистрант, e-mail: kruglik.a.s@mail.ru,

И. А. Лакман, канд. техн. наук, доц., e-mail: lackmania@mail.ru,
Уфимский государственный авиационный технический университет

Гибридный подход усиленной контентом коллаборативной фильтрации в области рекомендательных систем

Проводится эмпирическое исследование прогнозных свойств гибридной рекомендательной системы, основанной на подходе усиленной контентом коллаборативной фильтрации. Проводится сравнение по четырем различным метрикам качества с подходами рекомендательных систем: случайный прогноз, контентная фильтрация, коллаборативная фильтрация, усреднение прогнозов. Апробация подходов проводилась на данных о фильмах и рейтингах, поставленных пользователями. При применении метода усиленной контентом коллаборативной фильтрации результаты улучшаются на 15...20 % по сравнению с остальными подходами.

Ключевые слова: рекомендательная система, гибридный подход, контентная фильтрация, коллаборативная фильтрация

Введение

Быстрое развитие технологий, расширяющее возможности людей и обеспечивающее широкий доступ к почти любой информации, порождает проблемы, связанные с информационным поиском.

Несмотря на наличие мощных поисковых систем быстрый поиск нужной информации, товаров или услуг не всегда является осуществимым. Рекомендательные системы могут решить проблему информационной перегрузки путем фильтрации действительно важных фрагментов информации из огромного количества динамически генерируемых данных и, как следствие, повысить оперативность осуществления поиска.

Рекомендательные системы помогают уменьшить транзакционные издержки поиска информации и выбора товара в интернете, улучшить процесс принятия решений на основе анализа

данных. Таким образом, необходимость в эффективных и точных рекомендательных системах, которые обеспечат пользователю надежные, релевантные, персонализированные рекомендации, не может быть переоценена.

Современные рекомендательные системы, как правило, классифицируются в соответствии с их подходом к рейтинговой оценке. Общепринятая формулировка задачи рекомендации впервые была высказана в 1994—1995 гг., и с тех пор эта проблема была тщательно изучена [1]. Условно рекомендательные системы подразделяются на категории (рис. 1) в соответствии с типом генерируемых рекомендаций [2, 3]:

- контентно-ориентированные рекомендации (пользователю рекомендованы объекты, схожие с теми, которые пользователь предпочел ранее);
- рекомендации на основе совместной фильтрации (пользователю рекомендованы объекты, понравившиеся другим пользователям с похожими вкусами и предпочтениями);
- гибридные подходы.

Также существуют следующие подходы к генерированию рекомендаций, основанные на определенных признаках [3, 4]:

- рекомендации на основе сообществ (содружеств) (пользователю рекомендованы объекты, предпочитаемые его друзьями);
- рекомендации на основе социально-демографической информации (пользователю рекомендованы объекты исходя из его социально-демографических признаков);
- рекомендации на основе знаний (пользователю рекомендованы объекты, которые подходят ему лучше с точки зрения знаний предметной области).

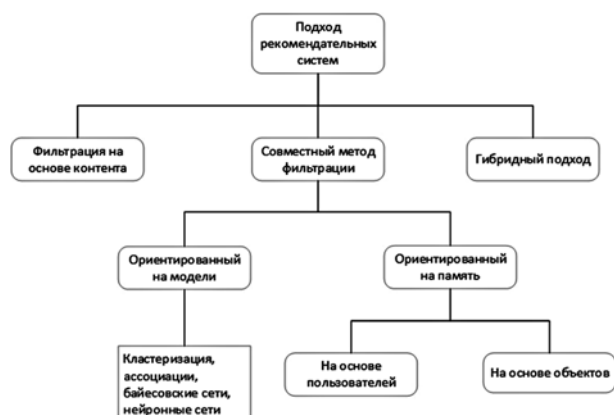


Рис. 1. Классификация подходов рекомендательных систем

Для преодоления недостатков отдельных подходов используют различные гибридные методы, основанные на совмещении "чистых" (негибридных) техник предсказания.

Целью исследования является улучшение качества прогнозирования предпочтений пользователей разработанной рекомендательной системы за счет применения гибридных подходов.

Существует множество исследований, посвященных применению гибридизации подходов к реализации рекомендательных систем. Применяется уменьшение размерности на группе контентно-ориентированных профилей (латентное семантическое индексирование). Используются фильтр-боты как агенты, анализирующие контент и в то же время являющиеся дополнительными участниками во множестве пользователей совместной фильтрации. Подход "совместной фильтрации через контент" основывается на традиционной совместной фильтрации при поддержке профиля пользователя с информацией о контенте [1]. Некоторые исследователи предложили комбинировать исходные данные, например, аспектная модель Хофманна была расширена добавлением агрегированной информации, состоящей из трех компонентов: пользователи, объекты, контент объектов [2].

Методология исследования

Большинство современных рекомендательных систем используют гибридный подход, сочетающий совместную фильтрацию, контентную фильтрацию и другие подходы. Нет никаких причин, по которым несколько различных методов не могли бы быть гибридизированы. Гибридные подходы могут быть реализованы несколькими способами [1, 5]:

- путем составления прогнозов рекомендаций на основе контента и на основе совместной фильтрации по отдельности с последующим их объединением;
- путем добавления основанных на контенте возможностей к подходу, основанному на совместной фильтрации (и наоборот);
- путем объединения подходов в одну модель.

Существуют исследования, в которых эмпирически сравнивают качество гибридных методов с подходом на основе совместной фильтрации и с методикой фильтрации контента [1, 5, 6]. Они показали, что гибридные методы могут дать более точные рекомендации, чем применение "чистых" подходов. Эти методы могут также использоваться для преодоления некоторых распространенных проблем в реко-

мендательных системах, таких как "холодный запуск" и "разреженность".

Исследования гибридных систем определили семь вариантов подходов [3]:

- *взвешенный* — численное объединение оценок различных компонентов рекомендаций;
- *переключение* — выбор между компонентами рекомендаций и применение выбранного метода;
- *смешанный* — рекомендации от разных рекомендательных подсистем объединены вместе, для формирования единого списка рекомендаций;
- *комбинация свойств* — характеристики, полученные из разных источников знаний, объединены и учтены в едином алгоритме рекомендаций;
- *расширение характеристик* — формирование новых свойств, являющихся входными данными в следующую подсистему;
- *каскадный подход* — каждая рекомендательная подсистема получает свой приоритет, при этом более низкий приоритет уступает подсистемам с высоким приоритетом;
- *мета-алгоритм* — применяется методика рекомендации в виде модели, используемой в последующей методике.

В настоящем исследовании предлагается методика построения рекомендательной системы, в основе которой лежит гибридный подход усиленной контентом совместной фильтрации (Content-Boosted Collaborative Filtering, CBCF), дающий более хороший результат, чем подход на основе совместной фильтрации (Collaborative Filtering, CF) и системы на основе контента (Content-based, CB) [7, 8].

В усиленной контентом совместной фильтрации сначала создается псевдовектор рейтингов v_u для каждого пользователя $u \in U$. Этот вектор v_u состоит из оценок объектов, предоставленных пользователем u , а вместо отсутствующего рейтинга какого-либо объекта стоит прогноз рейтинга от алгоритма рекомендательной системы на основе контента [7]:

$$v_{ui} = \begin{cases} r_{ui}, & \text{если пользователь } u \text{ оценил объект } i; \\ c_{ui}, & \text{иначе.} \end{cases}$$

В приведенном выше уравнении r_{ui} обозначает фактическую оценку, предоставленную пользователем u для объекта i , в то время как c_{ui} является прогнозом рейтинга от алгоритма на основе контента.

Вместе взятые псевдовекторы пользовательских оценок всех пользователей образуют плотную псевдоматрицу V . Далее алгоритм со-

вместной фильтрации использует эту плотную матрицу в качестве входных данных. Сходство между активным пользователем a и другим пользователем u вычисляется с использованием коэффициента корреляции Пирсона, косинусного подобия или другой меры. Вместо первоначальных оценок от пользователей используются рейтинги, предоставляющие собой псевдовекторы рейтингов v_a и v_u [7].

Для тестирования предлагаемой методики построения рекомендательной системы был выбран набор данных The Movies Dataset. Он представляет собой ансамбль данных, собранных из баз данных TMDb и Movie Lens лабораторией Group Lens. Информация о фильмах, актерах и ключевых словах были получены из открытого API TMDb (открытый API позволяет получить данные без авторизации и регистрации). Несмотря на использование API TMDb набор данных не одобрен или не сертифицирован TMDb. Их API также обеспечивает доступ к данным о многих дополнительных фильмах, актерах и актрисах, членах съемочной группе и телешоу [9].

Проводимую методику исследования можно уложить в следующую схему. На первом этапе разрабатывалась рекомендательная система на основе контентной фильтрации Content-based с последующим прогнозом рекомендации. Для этого предварительно проводилась предобработка данных: были удалены объекты с некорректной или с отсутствующей информацией, дубликаты объектов; проведен стемминг слов (слово заменяется на его основу); были удалены стоп-слова и редко встречающиеся слова для описания контента объектов. В последующем признаки были разделены на две группы на основе природы объектов (фильмы): описание контента (описание фильма и его слоган) и описание признаков (ключевые слова сюжета, актеры, режиссер и жанры). Из всех актеров в фильме были отобраны первые три по важности. Затем данные преобразовывались в вид, пригодный для обработки рекомендательной системой. Для описания контента была сформирована матрица токен—объект, основанная на TF — IDF мере (здесь TF — мера, равная отношению числа вхождений некоторого слова к общему числу слов документа, а IDF — мера, равная отношению общего числа документов к числу документов, в которых встречается это слово). Выбор в пользу данного метода был основан на возможности сузить признаковое пространство, что особенно актуально при обработке текстовых данных в виде разреженных матриц. Для описания признаков была сформирована матрица токен—объект, основанная на подсчете токенов TF . По каждой из преобразованных матриц была сформирована

матрица схожести с помощью косинусной меры. В конце выполнения данного этапа проводился прогноз рейтингов. Были получены спрогнозированные рейтинги для всех неопределенных объектов у всех пользователей по двум матрицам токен—объект, с последующим их усреднением по двум группам признаков.

На втором этапе разрабатывалась рекомендательная система на основе совместной фильтрации Collaborative Filtering с последующим прогнозом. Сначала была рассчитана матрица схожести пользователей. Для этого на основе матрицы рейтингов с помощью косинусной меры формировалась квадратная матрица схожести всех пользователей. В качестве меры сходства была выбрана косинусная мера, так как использование в качестве меры коэффициента корреляции Пирсона ухудшало метрики качества рекомендательной системы. Далее были спрогнозированы рейтинги, и для каждого пользователя через матрицу схожести находили 20 наиболее схожих пользователей — единомышленников. Значения рейтингов были рассчитаны с использованием рейтингов единомышленников и их нормализованных степеней сходства.

На третьем этапе разрабатывалась наивная гибридная рекомендательная система Naive Hybrid, которая усредняла прогнозы от рекомендательных систем на основе контента и на основе совместной фильтрации.

На четвертом этапе разрабатывалась рекомендательная система Random, прогнозирующая случайные значения рейтингов согласно закону равномерного распределения.

На пятом этапе разрабатывалась рекомендательная система на основе усиленной контентом совместной фильтрации Content-Boosted Collaborative Filtering с последующим прогнозом. Сначала подсистема контентной фильтрации прогнозировала рейтинги. Далее исходные и спрогнозированные рейтинги были объединены в плотную (полностью заполненную) псевдоматрицу. Это один из ключевых моментов данного гибридного подхода. Затем подсистема совместной фильтрации рассчитывала матрицу схожести пользователей, но не на основе исходной матрицы рейтингов, а на основе псевдоматрицы. В этом и состоит основная идея данного гибридного подхода. В результате подсистема совместной фильтрации прогнозировала рейтинги с учетом полученной ранее матрицы схожести.

На шестом этапе для пяти разработанных рекомендательных систем (Random, Content-based, Collaborative Filtering, Naive Hybrid, Content-Boosted Collaborative Filtering) рассчитывали четыре метрики, позволяющие оценить качество полученных прогнозов и провести

сравнение алгоритмов. В отличие от многих исследований [1, 2], в которых используются или описываются от одной до трех метрик, сравнение было проведено по четырем метрикам. Каждая метрика оценивает определенное качество рекомендательной системы: ошибка прогноза рейтинга объекта, разделимость множества объектов на подходящие пользователю и неподходящие, ранжирование объектов по убыванию релевантности. Такой подход позволяет дать обоснование мощности предсказания выбранной рекомендательной системы.

Метрики качества предсказания формировались на основе множества P пар (пользователь, объект), для которых алгоритм предсказал рейтинг p_{ui} объекту u от i -го пользователя, т.е. $P = \{(u, i) | p_{ui} \neq \emptyset, u \in U, i \in I\}$; r_{ui} — реальный рейтинг. При сравнении алгоритмов использовались следующие метрики качества:

- средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error, MAE)

$$MAE = \frac{1}{|P|} \sum_{(u,i) \in P} |p_{ui} - r_{ui}|;$$

- средняя квадратичная ошибка (Root Mean Square Error, $RMSE$)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{|P|} \sum_{(u,i) \in P} (p_{ui} - r_{ui})^2};$$

- площадь под ROC-кривой (Area Under the ROC Curve, AUC_{ROC}). AUC может находиться в интервале от 0 до 1: при идеальном алгоритме значение будет равно 1 или близкое к 1, а при случайном поведении рекомендаций (так называемые бесполезные, случайные рекомендации) — 0,5 [5, 7];
- метрика оценивания ранжирования $MAP@k$ (Mean Average Precision at k)

$$MAP@k = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{1}{K_j} \sum_{k=1}^{K_j} Precision@k,$$

где N — число пользователей, т.е. $|U|$, или (поисковых) запросов; k — число топ-объектов. Метрика MAP (среднее) в данном исследовании будет означать усреднение значений $MAP@1$, $MAP@2$, ..., $MAP@10$. $Precision$ — точность с учетом случайной природы ошибок:

$$Precision@k = \frac{TP@k}{k},$$

где $TP@k$ — число релевантных объектов в топ- k рекомендаций.

Методика в виде алгоритмов была реализована на языке программирования Python.

Вычислительный эксперимент

Для вычислительного эксперимента реализации предложенной методики использовали файлы из набора данных The Movies Dataset, содержащие метаданные для всех 45 000 фильмов, перечисленных в полном наборе данных Movie Lens [9]. Набор данных состоит из фильмов, выпущенных до июля 2017 г. включительно, и содержит информацию о составе актеров, съемочной команде, ключевых словах сюжета, бюджете, доходе, киноплакате, дате выхода, языках, производственных компаниях, странах производства фильмов, подсчете голосов TMDb, средних значениях голосов и др. Также имеются файлы, содержащие 26 миллионов оценок от 270 000 пользователей для всех 45 000 фильмов. Рейтинги находятся в диапазоне от 0,5 до 5,0.

Group Lens предоставляет набор данных The Movies Dataset в виде следующих файлов [9]:

- `movies_metadata.csv`: основной файл метаданных фильмов. Содержит информацию о 45 000 фильмах, представленных в полном наборе данных Movie Lens. В качестве атрибутов фильмов рассматриваются киноплакат, бюджет, доход, дата выпуска, языки, страны производства, кинокомпании, жанры фильма, название, слоган, словесное описание, длительность, режиссеры и др.;
- `keywords.csv`: содержит ключевые слова сюжета и описания для фильмов MovieLens. Доступно в виде строкового объекта JSON;
- `credits.csv`: содержит информацию об актерах, режиссере и съемочной группе для всех фильмов. Доступно в виде строкового объекта JSON;
- `links.csv`: файл, содержащий идентификаторы TMDb и IMDb для всех фильмов, представленных в полном наборе данных MovieLens;
- `ratings.csv`: полный набор из 26 миллионов оценок от 270 000 пользователей для всех 45 000 фильмов;
- `links_small.csv`: содержит идентификаторы TMDb и IMDb для небольшого подмножества (9000 фильмов) полного набора данных;
- `rating_small.csv`: подмножество 100 000 оценок от 700 пользователей для 9000 фильмов. Апробация алгоритмов проводилась именно на этих оценках.

Для корректности проведения вычислительного эксперимента использовалась стандартная процедура слепой валидации: для каждого пользователя поставленные им оценки фильмам были разделены на два множества — тренировочное (обучающее) и тестовое.

Первое содержит в себе 70 %, а второе — 30 % от всех оценок пользователя.

Последовательно были выполнены шесть этапов разработанной методики исследования на обучающем множестве оценок. На седьмом этапе обученные алгоритмы всех пяти рекомендательных систем были протестированы на тестовом множестве оценок. Таблица содержит сводку всех рассчитанных метрик качества результатов тестирования на подмножестве данных.

Обсуждение результатов

В результате проведенного вычислительного эксперимента лучшие метрики качества прогнозирования были получены (рис. 2) для подхода Content-boosted Collaborative Filtering построения рекомендательной системы (метрики MAE и RMSE имели меньшие значения, а AUCROC и MAP (среднее) — большие).

Для предсказания самих рейтингов были использованы стандартные формулы подхода совместной фильтрации вместо предложенного авторами оригинального метода [1]: после расчета схожести пользователей псевдоматрица была заменена на исходную матрицу рейтингов. Это улучшает результаты прогноза

рейтингов и ограничивает влияние псевдо-рейтингов. Также не было применено предложенное авторами оригинального метода гармоническое взвешенное среднее для упрощения расчетов и лучшей интерпретации результатов.

Подход Content-Boosted Collaborative Filtering для разработки рекомендательных систем хорошо интерпретируется. Обычный метод совместной фильтрации считает величину сходства двух пользователей тогда и только тогда, когда они оценили один или несколько абсолютно одинаковых объектов. В противном случае, если они оценивали разные объекты, эти пользователи будут абсолютно не схожи. Однако данное предложение не учитывает, что если сами объекты, оцененными этими пользователями, похожи, то и эти два пользователя могут быть потенциально схожи. Такой метод нахождения потенциальных схожих пользователей увеличивает число ближайших соседей [7]. При этом ранжирование единомышленников может кардинально измениться, следовательно, изменятся и предсказанные значения по сравнению с обычным методом CF.

Простой метод CF не может предсказать рейтинг от пользователя объекту, который не был оценен ни одним пользователем — это означает, что этот объект никогда не будет рекомендован. Подход усиленной контентом совместной фильтрации CBCF решает эту проблему с помощью совместного применения алгоритма CB, предварительно предсказывая для этого объекта оценки от других пользователей [1, 7].

Заключение

Проведенные эксперименты показали, что рекомендательная система, построенная на основе гибридного метода усиленной контентом совместной фильтрации работает лучше, чем системы, базирующиеся на "чистых" подходах (на основе контента, совместной фильтрации, случайном подходе), а также лучше гибридной наивной (равновзвешенной) системы. Включение информации о контенте в совместную фильтрацию может значительно улучшить качество предсказания рекомендательной системы в среднем на 15...20 % по четырем метрикам тестирования.

Подход Content-Boosted Collaborative Filtering элегантно использует контент в рамках совместной фильтрации. Он преодолевает недостатки обоих методов — совместной фильтрации и контентной фильтрации — путем укрепления контентом совместного метода фильтрации. Кроме того, благодаря модуль-

Сводка результатов тестирования подходов (подмножество данных)

Подход к построению рекомендательной системы	Метрика качества прогнозирования			
	MAE	RMSE	AUC ROC	MAP (среднее)
Random	1,3539	1,6709	0,5042	0,1222
Content-based (CB)	0,7337	0,9457	0,6853	0,1336
Collaborative filtering (CF)	0,7744	0,9993	0,6682	0,1477
Naive Hybrid	0,7274	0,9358	0,6945	0,1507
Content-Boosted Collaborative Filtering (CBCF)	0,5837	0,7809	0,8059	0,1968

Сравнение алгоритмов по метрикам

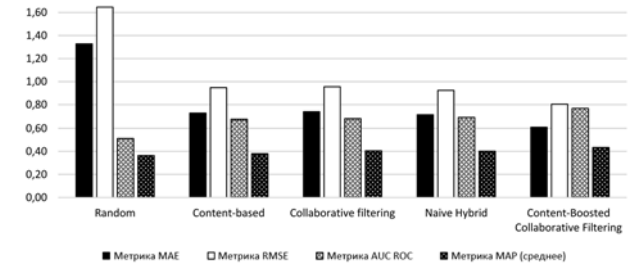


Рис. 2. Сравнение алгоритмов по метрикам (подмножество данных)

ной природе данной гибридной системы любые улучшения в совместной фильтрации или контентно-ориентированной подсистеме могут быть легко использованы для создания более мощной рекомендаций системы.

Недостатком реализованной рекомендательной системы является увеличение времени обучения алгоритма и требуемой для этого оперативной памяти. Эти проблемы решаются применением распараллеливания алгоритма и кластеризации пользователей и объектов с последующим отбором наиболее подходящего для обучения алгоритма кластера.

Список литературы

1. **Adomavicius G., Tuzhilin A.** Toward the Next Generation of Recommender Systems: A Survey of the State-of-the-Art and Possible Extensions // *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. June 2005. Vol. 17, N. 6.
2. **Encyclopedia** of Machine Learning. Chapter № 00338. 2010.

3. **Burke R.** Hybrid Web Recommender Systems // *Wayback Machine, The Adaptive Web. Lecture Notes in Computer Science. Lecture Notes in Computer Science*. Springer-Verlag, Berlin, Germany. May 2007. Vol. 4321. P. 377—408.

4. **Sidnooma Christian Kabore.** Design and implementation of a recommender system as a module for Liferay portal // Master's Thesis. Barcelona School of Computing, University Polytechnic of Catalunya. Master in Information Technologies. September 2012.

5. **Isinkaye F., Folajimi F., Ojokoh B.** Review Recommendation systems: Principles, methods and evaluation // *Egyptian Informatics Journal*. 2015. Vol. 16. P. 261—273.

6. **Ricci F., Rokach, L., Shapira, B.** Recommender System Handbook. New York: Springer, 2011.

7. **Melville P., Mooney R., Nagarajan R.** Content-Boosted Collaborative Filtering for Improved Recommendations // *Proceedings of the Eighteenth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2002)*. Edmonton, Canada, July 2002. P. 187—192.

8. **Herzog D., Wornld W.** Extending Content-Boosted Collaborative Filtering for Context-aware, Mobile Event Recommendations // *WEBIST 2016 — 12th International Conference on Web Information Systems and Technologies*. 2016.

9. **The Movies** Dataset. URL: <https://www.kaggle.com/rounakbanik/the-movies-dataset>.

A. S. Kruglik, Postgraduate, e-mail: kruglik.a.s@mail.ru,

I. A. Lackman, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: lackmania@mail.ru,
Ufa State Aviation Technical University

Hybrid Approach Content-Boosted Collaborative Filtering in the Field of Recommendation Systems

In this article, we conducted an empirical study of the predictive properties of hybrid recommendation system based on Content-Boosted Collaborative Filtering approach. The aim of the study is to improve the quality of forecasting the preferences of users of the developed recommendation system using of hybrid approaches. They overcome the disadvantages of individual approaches which predictions user preference. It is compared by four different quality metrics with other approaches of recommendation systems: random prediction, content-based filtering, collaborative filtering, averaging prediction. These approaches were tested on data on films and ratings provided by users. Content-Boosted Collaborative Filtering approach improves the result by 15—20 %, compared to other approaches. The usual method of collaborative filtering calculates the similarity of two users if and only if they rated one or more identical objects. Otherwise, if they rated different objects, then these users will be completely different. However, this proposal does not take into account that if the objects themselves rated by these users are similar, then these two users can be potentially similar. This method of finding potential similar users increases the number of nearest neighbors. In addition, the ranking of like-minded people can change significantly, therefore, the value of the predictions will also change in comparison with the usual CF method.

Keywords: recommendation system, hybrid approach, content-based filtering, collaborative filtering

DOI: 10.17587/it.26.523-528

References

1. **Adomavicius G., Tuzhilin A.** Toward the Next Generation of Recommender Systems: A Survey of the State-of-the-Art and Possible Extensions, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, June 2005, vol. 17, no. 6.
2. **Encyclopedia** of Machine Learning. Chapter № 00338, 2010.
3. **Burke R.** Hybrid Web Recommender Systems, *Wayback Machine, The Adaptive Web, Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, May 2007, vol. 4321, pp. 377—408.
4. **Sidnooma Christian Kabore.** Design and implementation of a recommender system as a module for Liferay portal, Master's Thesis. Barcelona School of Computing, University Polytechnic of Catalunya. Master in Information Technologies, September 2012.

5. **Isinkaye F., Folajimi F., Ojokoh B.** Review Recommendation systems: Principles, methods and evaluation, *Egyptian Informatics Journal*, 2015, vol. 16, pp. 261—273.

6. **Ricci F., Rokach L., Shapira B.** Recommender System Handbook, New York, Springer, 2011.

7. **Melville P., Mooney R., Nagarajan R.** Content-Boosted Collaborative Filtering for Improved Recommendations, *Proceedings of the Eighteenth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2002)*, Edmonton, Canada, July 2002, pp. 187—192.

8. **Herzog D., Wornld W.** Extending Content-Boosted Collaborative Filtering for Context-aware, Mobile Event Recommendations, *WEBIST 2016 — 12th International Conference on Web Information Systems and Technologies*, 2016.

9. **The Movies** Dataset, kaggle: online community, available at: <https://www.kaggle.com/rounakbanik/the-movies-dataset>.

С. М. Авдошин, канд. техн. наук, руководитель департамента программной инженерии, проф.,
e-mail: savdoshin@hse.ru,

А. В. Чернов, преподаватель, e-mail: achernov@hse.ru,

Е. Ю. Песоцкая, канд. экон. наук, доц., e-mail: epesotskaya@hse.ru,
Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"

Сервис цифрового контента для удаленного обучения

Образование является важным фундаментом, на котором строится любая область современного мира. Именно качественное образование позволяет учащимся претендовать на перспективные рабочие места, а работодателям — получать более подготовленных сотрудников. Понимая под образованием не только учебный процесс, но и получение различных знаний в ходе чтения электронной литературы, авторы ставят цель разработать концепцию и требования к новому сервису для работы с цифровым контентом, который сможет преодолеть существующие барьеры использования цифрового контента, наладить удобную двустороннюю коммуникацию между автором и читателем, а также эффективно дополнить существующие и развиваемые платформы онлайн-образования. Формирование подхода основано на анализе потребностей и интересов всех участников рынка образования с учетом трендов трансформации учебных заведений и образования цифровых университетов.

Ключевые слова: образование, образовательные сервисы, цифровой контент, онлайн-обучение, трансформация, цифровой университет

Введение

За последнее десятилетие человечество совершило значительный прорыв в технологиях, что, безусловно, коснулось сферы образования, в том числе дистанционного. Под влиянием цифровизации кардинально меняются рынок труда, здравоохранение, образование, пространственное развитие [1]. Можно отметить тенденции использования больших данных для улучшения курсов, персонализации курсов, внедрения технологий виртуальной и дополненной реальности, уменьшения объемов курсов (микрообучение и мини-программы), применения машинного обучения и искусственного интеллекта. Анализ сегмента EdTech (сокр. от англ. Educational Technology — образовательные технологии), проведенный в рамках настоящего исследования, позволяет выделить следующие основные тренды [2]:

1. Смешанное обучение (blended learning) объединяет традиционную (очную) форму с дистанционной. Такие комбинированные программы видятся экспертам настолько же эффективными, как очные, а часто и превосходящими их.

2. Личность важнее места. Значимость человека в онлайн-образовании возрастает, в то

время как онлайн-площадка становится не так важна при выборе провайдера образовательных услуг. Желющие получить знания приходят к конкретному спикеру, который сумел завоевать репутацию на рынке, создал собственный бренд и вызывает доверие на основе многочисленных рейтингов.

3. На рынок EdTech выходят крупные ИТ-гиганты. Apple, Amazon, Google, Microsoft конкурируют на почве интеграции своих продуктов, таких как Google Apps for Education и Microsoft Office 365, в деятельность высших учебных заведений. Рынок EdTech быстро растет, особенно в развивающихся странах.

Выявленные тренды говорят о том, что в скором времени мы можем ожидать ухода от традиционных форм образования, перевода многих курсов, в том числе университетских, в режим онлайн, что потребует перевода всех образовательных материалов на электронную площадку. По мнению Я. Кузьминова, ректора НИУ ВШЭ, "в ближайшие два года вуз выйдет на замещение всех лекций онлайн-курсами... Традиционных учебников в школах не останется, они доживают последние 10 лет. Огромное цифровое "образовательное облако" заполнится методиками тысяч разных учителей...

Единственное препятствие на пути тотального перехода образования в онлайн связано не с техникой, а с особенностями психики. И пока платформы умеют делать не все из того, что делают университеты".

Современные проблемы требуют современных решений, поэтому образовательные организации встают на путь цифровизации, обеспечивая свою аудиторию возможностями для обмена накопленным опытом и знаниями, предоставляя доступ к информации. Стоит отметить важность развития инновационной корпоративной культуры и системы организации — платформы для внедрения и приятия нового формата обучения. Переход на цифровую экономику обеспечит образовательным организациям высокую популярность среди пользователей их услуг, создание благоприятных условий для научной и творческой деятельности.

К ключевым задачам, которые стоят сегодня перед образованием, относятся создание учебного контента, отвечающего требованиям динамично изменяющегося рынка труда и потребностям человека, а также сокращение расходов за счет использования технологий [3]. Последние тенденции сводятся к большему распространению удаленного обучения и получения дистанционного цифрового контента. Под цифровым контентом в широком смысле стоит понимать онлайн-курсы, видеоматериалы, цифровые библиотеки и тексты, игры и приложения. В области образования такой контент выводится из сферы статического воспроизведения учебников и учебных пособий и переносится в область программного обеспечения для интерактивного образования и продуктов онлайн-обучения [4]. Под электронной книгой и периодикой сегодня следует понимать не только продукты в виде файлов, которые можно приобрести на сайтах издательств или книжных электронных площадках, но и процессы распространения этих продуктов для целевой аудитории, а также процессы "собственного чтения", направленного на получение нужной информации быстрым и удобным образом [8].

В рамках настоящего исследования под цифровым контентом авторы будут понимать любую текстовую информацию, которая может быть представлена в виде текстов учебников, презентаций, отсканированных изображений, любой электронной литературы, в том числе онлайн-курсы, цифровые библиотеки (за исключением видеоконтента и игр). Если провести параллель между образованием "как учебным процессом" и образованием "как про-

цессом чтения цифрового контента и общения с авторами по интересующим вопросам", то основная задача, которую ставят перед собой авторы исследования, заключается в определении свойств и функциональности инновационного сервиса цифрового контента, способного привлечь максимальное число пользователей на свою платформу и обеспечить качество услуг. Это всецело соответствует ориентированности на адаптацию образования к новым требованиям в условиях цифровизации экономики как одного из приоритетных проектов развития Российской Федерации [5].

Уход от традиционных форм образования и перевод многих курсов, в том числе университетских, в режим онлайн подразумевает переход образовательных материалов на цифровую платформу. Но одна из проблем, с которой сталкиваются пользователи цифрового образовательного контента, заключается в неполном либо некорректном понимании читателями мыслей авторов при отсутствии возможности задать автору интересующий вопрос и получить ответ в один клик. Несмотря на высокий уровень самостоятельности и экспертизы современного студента он нуждается и будет нуждаться в грамотном менторе, наставнике [6], который сможет ответить на появляющиеся в процессе обучения вопросы, поможет разобраться, понять и не потеряться в массе неконструктивных и неактуальных источников информации, распространившихся по сети Интернет [7]. Сегодня сама роль студента в образовательном процессе претерпела значительные изменения: он уже не просто пассивный слушатель и читатель, он хочет непосредственно участвовать в процессе познания, он способен вести аргументированные дискуссии в поисках истины [9]. Поэтому при изучении специальной, образовательной, учебной литературы студенту недостаточно просто принять написанное как должное, он хочет спросить, разобраться и понять образовательный материал.

Основной целью работы является определение подхода и концепции нового сервиса по работе с цифровым контентом, который обеспечит постоянное общение между студентами и владельцами образовательного контента. Авторы настоящего исследования предлагают новый формат обмена знаниями и разработку сервиса для активных читателей и коммуникабельных авторов, который позволит обсуждать вопросы в ходе чтения, получать ответы и советы авторов. Предполагается, что с помощью предлагаемого авторами веб-сервиса читатель получит

возможность связаться непосредственно с автором интересующего материала (или предметным экспертом), задать интересующие вопросы, поделиться своим мнением. Сервис может служить дополнением к существующим электронным библиотекам вузов, любым электронным площадкам (ЛитРес, Ридеро, BookMate и проч.), электронным изданиям (любым журналам и периодике, которая выходит в отечественном медиaprостранстве), отечественным платформам электронного образования (Smart University, Lecta и проч.), предоставляя дополнительные услуги и функции читателям и авторам.

В целях исследования авторами проведен анализ концепции цифрового университета, обучения и цифрового контента (раздел 1) для понимания предпосылок и потребностей в новом сервисе, далее предложены подходы к созданию сервиса по общению между автором и читателем (раздел 2), также возможности монетизации и предложения по дальнейшим шагам (раздел 3) и заключение.

1. Концепция цифрового обучения и цифрового контента

Использование цифровых устройств в мировых учебных заведениях становится нормой. Некоторые ученые считают, что цифровые технологии в образовании могут не только привести к появлению практик, являющихся простыми альтернативами традиционным, но и существенным образом изменить сам процесс обучения [10]. В школах разрешено использование гаджетов для доступа к школьной беспроводной сети при условии, что учащиеся обязуются использовать гаджет в учебное время исключительно в образовательных целях. Авторы изучают эффективность использования мобильных устройств в целях обучения и отмечают их пользу, в том числе дают рекомендации для разработчиков образовательного онлайн-контента учитывать высокую вероятность просмотра на мобильном устройстве, т. е. адаптировать материал под iOS и Android [11, 12]. Данная тенденция использования гаджетов одновременно способствует снижению затрат образовательных учреждений на цифровизацию, а также популяризации цифрового образования. Особое значение приобретает формирование образовательных программ, отвечающих глобальным трендам, и персонализированных траекторий обучения, способных обеспечить "цифровую грамотность" [1]. Так, многие университеты уже

вступили в новый этап своего развития под названием Университет 4.0, или "Цифровой Университет", и предлагают новый формат работы, предполагающий использование современных, прогрессивных подходов к реализации основных видов своей деятельности [13, 14].

Для соответствия требованиям цифрового мира традиционные университеты должны, по сути, изобрести себя заново: быстро перейти от привычного управления процессом обучения (портфелем программ) к управлению образовательным опытом своей целевой аудитории. Поэтому понятие "технологии" сегодня трактуется значительно шире и включает не только инновационные методы образования, возможные благодаря развитию интернета, мобильной связи и технологий виртуальной и дополненной реальности, но и инновационные управленческие технологии повышения эффективности обучения.

Формируется понятие "цифрового обучения", которое уже можно найти во всех развитых странах, предпосылкой которого явилось дистанционное образование. Дистанционное образование, в свою очередь, восходит к середине 19 века [15], однако глобальный сдвиг в сторону реализации и оптимизации этого процесса начался около пятидесяти лет назад и сделал дистанционное образование весьма актуальным сегодня [16].

Появление цифровых носителей и электронных ресурсов послужило катализатором цифровой трансформации и помогло сформироваться новому виду цифрового обучения. Цифровые носители удобны для обучения, поиска информации, восприятия благодаря анимации и графике [17].

Среди преимуществ цифрового обучения ряд авторов, изучающих проблематику цифровых университетов и онлайн-образования [18–21], выделяет следующие ключевые преимущества:

1. Обеспечение доступа к образовательным ресурсам с любого устройства, включая мобильные устройства, возможность записи онлайн-трансляций.

2. Предоставление дополнительных образовательных сервисов и услуг (интерактивные формы обучения, групповые трансляции и дискуссии, онлайн-тестирование и определение уровня знаний, автоматизированные рейтинги студентов по результатам их онлайн-активностей и проч.).

3. Повышение качества обучения и образовательных ресурсов за счет организации единого информационного пространства.

Онлайн-обучение давно появилось на рынке образовательных услуг, но его популярность во всем мире по-прежнему интенсивно нарастает. Если раньше онлайн-обучение было лишь инструментом дистанционного образования и использовалось только учащимися, которые в силу определенных причин не могут посещать учебное заведение, то сегодня оно стало частью традиционного обучения. Вместе с тем ряд авторов [22] отмечает присущие ему недостатки, такие как отсутствие прямого контакта между учителем и учениками, ограниченность, либо практическое отсутствие возможности личного контакта и общения с преподавателем, что приводит к невозможности получить эмоциональность и неповторимую оригинальность изложения учебного материала, которую может генерировать только высококвалифицированный педагог — учитель, в то время как межличностные отношения являются важным элементом эффективного обучения. Также авторами работы [23] отмечается отсутствие своевременного разъяснения преподавателем непонятого материала в ходе онлайн-обучения. Онлайн-платформа может предоставлять доступ ученикам к форуму для связи с преподавателями, но ожидание ответа может занимать продолжительный промежуток времени. Стандартная система, используемая в большинстве вузов на сегодняшний день, не позволяет уделять достаточное время каждому студенту лично в нужном количестве [24]. В учебном процессе имеется явный дефицит качественных цифровых методических материалов, а то, что есть, трудно донести до студента [25].

Прослеживается важный тренд — персонализированное обучение, которое предполагает отказ от унифицированных схем образования и переход к персональному обучению, построенному на учете особенностей, способностей и потребностей каждого учащегося, что позволяет повысить качество обучения и способствует внедрению технологий цифрового обучения, таких как виртуальное обучение. Однако цифровизация образования приносит и ряд сложностей, требуя решения вопросов адаптации образовательной системы к цифровой среде, проработки этических аспектов применения цифровых технологий в долгосрочной перспективе. Переход к персонализированному обучению делает необходимой реализацию системы адаптивного образования и оценки, позволяющей максимально учитывать потребности, уровень и интересы обучающегося. Преподаватель становится в большей степени наставником и

навигатором в образовательном процессе, а не "репродуктором" информации [1]. В настоящее время очень часто можно слышать мнение о "выведении" квалифицированного преподавателя (профессора, доцента, старшего преподавателя) за рамки образовательного процесса и отведения ему роли "писателя" или разработчика методических пособий, рабочих программ, "составителя" фонда оценочных средств, образовательных программ и различных инструктивных документов [26].

На новой ступени качества высшего образования диалог учащегося и преподавателя становится абсолютно недостаточен, если он не опосредован дополнительной информацией и практической работой, которые и должна предложить информационно-образовательная среда. Преподавателю недостаточно сообщать в устном виде базовую информацию по предмету. В последнее время набирает вес понятие "перевернутого класса" [27] в соответствии с которым основная работа по получению базовой информации по предмету происходит вне урока. Чтение — по определению — пассивный статический процесс усвоения. Книга не самодостаточна, она требует рядом с собой поводыря, толкователя [28].

В настоящей работе предлагается дополнить концепцию цифрового обучения специализированным веб-сервисом, способным взаимодействовать с издательствами и площадками электронной литературы и таким образом связывать конечного пользователя цифрового контента (читателя) с его авторами для повышения качества образования, более успешного усвоения образовательных материалов.

2. Концепция нового сервиса цифрового контента для удаленного обучения

В рамках настоящего исследования авторы предлагают новый формат обмена знаниями и разработку веб-сервиса для активных пользователей образовательных площадок (учащихся) и коммуникабельных авторов — экспертов в различных предметных областях, который позволит обсуждать вопросы в ходе чтения, получать ответы и советы от авторов или экспертов. Сервис может служить дополнением для любой существующей площадки электронной литературы, такой как "Амазон" (www.amazon.com), "ЛитРес" (www.litres.ru) или университетской электронной библиотеки.

Основной вопрос, который ставят перед собой авторы исследования: какими свойствами

и функциональностью должен обладать такой цифровой сервис, чтобы привлечь максимальное число пользователей и обеспечить качество услуг. Для этого были проанализированы интересы потребителей и производителей образовательных услуг в зависимости от целей использования сервисов по работе с литературой и другими видами цифрового контента.

2.1. Определение интересов и предпочтений пользователей цифрового контента

Существующие на российском рынке платформы по работе с электронной литературой не делают уникального предложения в сфере общения авторов и читателей и не всегда удовлетворяют желаниям пользователей, которые хотят более подробно разобраться в материале, но не имеют возможности напрямую обсудить с автором вопросы, дать обратную связь, оставить пожелания и рекомендации по дальнейшей научной или публицистической работе. Даже самые популярные платформы не имеют встроенной функции онлайн-общения с пользователем в контексте изучаемой электронной литературы. Недостаточно учитываются потребности пользователей образовательного процесса, процесс взаимодействия с платформой вызывает сложности и не способствует продолжению пользования публикуемыми материалами.

Для того чтобы определить подход к разработке веб-сервиса, необходимо понять, что нужно аудитории и чего ей сейчас не хватает, а именно определить интересы потребителей и производителей.

К *потребителям* или пользователям можно отнести студентов и лиц, продолжающих академическую деятельность. Пользователи хотят доступа к источникам информации, но при этом им не хватает возможности коммуникации с автором этого источника информации для более глубокого анализа темы. Для того чтобы достичь своих целей, потребителям необходима некая технологическая платформа, которая позволит осуществлять обмен знаниями, опытом и идеями в простой, удобной и быстрой манере.

Также важно различать пользователей по видам используемого ими цифрового контента.

Пользователи учебной/специальной литературы, как правило, сталкиваются с вопросами по материалу и испытывают потребность в советах, как применить рекомендации автора. Авторам (или предметным экспертам, которым близок материал книги) может оказаться полезным получать обратную связь от читате-

лей, отвечать на их вопросы и давать рекомендации.

Отдельно можно выделить статьи в научных или научно-популярных журналах, электронные ресурсы и курсы. Если читатели разделяют взгляды автора на предмет исследования, они направляют запрос, чтобы автор глубже раскрыл тему в новой статье или дал читателям совет. Авторы понимают, что периодика становится более успешной при лояльных читателях. Поэтому, если автор понимает ожидания читателей, то это залог успеха его публикаций.

В случае, если читатель сталкивается с более сложными предметами, например это могут быть материалы и рекомендации по развитию профессиональных навыков и техник, которые включают дневники мероприятий и экспертные мнения, тогда людям необходимо понять принципы и тренировать навыки, и здесь у них возникает желание узнать, все ли правильно делается. Эксперты, имеющие хороший практический опыт и желание его применять, смогут изучить действия людей и объяснить, что они делают неправильно.

В случае работы с художественной литературой читателям может нравиться творчество автора, они хотят узнать его творческие планы или поделиться своей идеей — это хорошая эмоция. Авторы хотят дорожить мнением читателей и их эмоциями. Для этого они готовы "сократить дистанцию" с заинтересованной аудиторией.

К *производителям* можно отнести площадки электронного контента, правообладателей публикуемых материалов (авторов) и экспертов (людей, глубоко разбирающихся в предметных вопросах). Это могут быть сотрудники компаний, преподаватели передовых вузов, эксперты из различных отраслей и просто люди, желающие поделиться своим профессиональным взглядом через статьи, публикации, исследования, разного рода литературу, а также через консультации в контексте любой литературы по своему предмету.

Среди мотивов производителей можно выделить следующие: желание получить объективную критику, свежие идеи, увидеть другой подход к изучению проблемы, заработать на консультациях. Это означает, что производители также хотят удобных коммуникаций со своими компетентными читателями.

Производитель и потребитель — не постоянные роли. В процессе взаимодействия они могут меняться между собой в зависимости от того, выкладывает ли человек свою статью в сеть или задает вопрос по работе (или книге) другого участника сервиса.

2.2. Концепция веб-сервиса по работе с цифровым контентом

После выявления интересов пользователей необходимо понять, что должен представлять веб-сервис по работе с цифровой литературой и другим образовательным контентом, как будут взаимодействовать с ней участники и как они будут взаимодействовать между собой.

С одной стороны, веб-сервис может выступать агрегатором электронной литературы, в том числе доступной ограниченному кругу лиц (например, электронные библиотеки высших школ), которая уже размещена и продолжает размещаться на различных площадках, открытых для любого посетителя. Авторы книги или независимые эксперты, преподаватели по предметной области готовы удаленно взаимодействовать с читателями.

Сервис должен объединять производителей с потребителями и позволять им обмениваться ценностью. Для потребителей образовательных услуг это доступ к курсам, учебным материалам, экспертам, возможности коллективного обучения и личного контакта с преподавателем. И потребители, и производители получают доступ к инструментам и услугам, которые облегчают взаимодействие.

С другой стороны, новый веб-сервис может являться средством, которое позволяет участникам опубликовать собственный контент и организовать его конструктивное обсуждение. Например, читатель может загрузить уже имеющуюся у него электронную книгу, заполнить для нее классификатор, найти экспертов для обсуждения вопросов по данной книге "на полях" электронного материала, пригласить других заинтересованных читателей к дискуссии. Если же участник сервиса приобретает "запутанные" знания, которые должны проявиться в форме закрепленных профессиональных навыков (например, спортивные тренировки для достижения определенных целей), он может создать свой блог (дневник тренировок) и пригласить соответствующих экспертов для получения консультаций в контексте своего цифрового дневника.

В рамках настоящего исследования авторы предлагают выделить концепцию сервиса, направленного на дополнительное общение авторов и читателей. Это легкое, простое и понятное решение для заинтересованного человека, который хочет побыстрее разобраться в любом материале, находящемся прямо сейчас перед глазами, и готов для этого обращаться к авторам материала (как к наиболее очевидным

в данной ситуации экспертам) либо к иным предметным экспертам "в один клик".

Ключевой возможностью веб-сервиса является обмен идеями и мнениями, помощь в понимании материала и осознании изложенного. Пользователи должны иметь доступ к рекомендованному и популярному контенту учебных курсов в идеале через сервисы личного кабинета в LMS как наиболее популярного и зарекомендовавшего себя в образовательной среде [29]. В соответствии с профилем пользователя (возможен также анализ профиля в социальных сетях) пользователю доступен раздел рекомендаций — предоставление максимально релевантных подборок в зависимости от его интересов. Категоризация контента может быть также реализована за счет других пользователей, которые проставляют теги по профессиям/отраслям/функциям для более удобной навигации. В продвинутой версии для категоризации следует использовать искусственный интеллект. Фильтрация контента позволит осуществлять поиск необходимых курсов в зависимости от текущих предпочтений и задач пользователя.

По мнению авторов, такой веб-сервис имеет достаточно большой потенциал и невысокую конкуренцию на рынке, поскольку многие периодические издания уже представлены в электронном виде, при этом периодические издания существенно зависят от лояльности читателей.

2.3. Функциональность веб-сервиса по работе с цифровым контентом

К пользователям цифрового контента относятся все читатели любых электронных площадок, на которых размещены электронные книги, пресса, любые литературные источники и электронные курсы. Эти пользователи будут составлять аудиторию нового веб-сервиса.

Для удобства регистрации пользователям доступна быстрая регистрация на платформе в один клик, после чего зарегистрированные пользователи приобретают цифровой контент (онлайн-курс / электронную книгу / журнал) с необходимым периодом на общение с авторами/экспертами. Это означает начало общения с авторами книги или статьи, что сопровождается специальным индикатором — значком для диалогов с авторами/экспертами, а также ответами авторов на вопросы "на полях" электронного материала.

Пользователям, в свою очередь, должны быть доступны функции чтения цифрово-

го контента, просмотра электронных курсов, общения с авторами и экспертами в контексте изучаемого материала. Предусмотрена возможность чтения блогов авторов и открытых дискуссий, добавления комментариев к публикациям в блогах и ответам на вопросы по контенту, а также возможность пригласить единомышленников — других читателей, заинтересованных в совместном изучении материала. Пользователи также могут создать или загрузить свой контент для организации его обсуждения с экспертами или единомышленниками.

Читатели одного и того же цифрового контента могут найти друг друга, с тем чтобы совместно получать консультации экспертов по изучаемой книге. Кроме того, пользователь при необходимости может создать и вести блог (дневник) мероприятий, связанных с получением необходимых навыков, и запрашивать консультации предметных экспертов в контексте описываемых мероприятий и своих целей.

3. Ограничения и дальнейшее развитие

Для веб-сервиса по работе с цифровым контентом уже созданы технические компоненты, в стадии проектирования находится средство для чтения электронной литературы с возможностью переписки и обмена голосовыми сообщениями "на полях" и через средство онлайн-диалогов. Но для полноценного запуска веб-сервиса остается решить возможности монетизации и внедрения сервиса.

В базовой финансовой модели монетизации сервисов [30] предполагается, что читатель оплачивает доступ к электронному контенту с подпиской на взаимодействие с авторами/экспертами на оговоренный срок. При желании сохранить у себя контент книг и консультации авторов или экспертов читатель оплачивает стоимость книг, после чего доступ к ним становится бессрочным. Представленная базовая модель легко трансформируется, например, издательство периодики может предложить читателям годовую подписку, которая будет оплачиваться заинтересованными читателями через веб-сервис и предоставляться в виде доступа ко всем выпускам электронных журналов с возможностью вести онлайн-диалоги и общаться с авторами статей в течение года. Аналогичным образом, высшие учебные заведения смогут оплатить годовую подписку своих студентов на онлайн-взаимодействие с wybranymi преподавателями в рамках

электронных курсов и внешними авторами учебной литературы, после чего предоставить студентам коды доступа, которые сгенерирует предложенный веб-сервис.

Заключение

Понимая под образованием получение различных знаний в ходе изучения цифрового контента, авторы предлагают концепцию нового веб-сервиса, способного обеспечить двустороннюю коммуникацию между автором контента, читателем и предметными экспертами, а также эффективно дополнить существующие и развиваемые платформы онлайн-образования.

Для достижения поставленной цели авторы проанализировали потребности аудитории, текущие тренды в области цифрового образования, возможность получения готовых материалов с внешних площадок, а также готовность авторов, экспертов и читателей к использованию предлагаемого сервиса. Формирование подхода происходило на основании учета различных потребностей и интересов всех участников рынка. Авторами предложены рекомендации по разработке инновационного веб-сервиса для образовательных структур и пользователей цифрового контента.

Список литературы

1. Абдрахманова Г. И., Вишневский К. О., Гохберг Л. М. и пр. Что такое цифровая экономика? Тренды, компетенции, измерение. Доклад НИУ ВШЭ на XX Апрельской международной научной конференции по проблемам развития экономики и общества. URL: https://www.hse.ru/data/2019/04/12/1178004671/2%20Цифровая_экономика.pdf (дата обращения: 30.03.2020).
2. Avdoshin S. M., Pesotskaya E. Y. Development of P2P Educational Service in Russia // Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC). 2019. Vol. 2. Switzerland, Springer, 2020. P. 833—847.
3. Global Education Futures Report (2018). Образование для сложного общества. URL: <http://www.edutainme.ru/post/global-education-futures-report/> (дата обращения: 04.02.2020).
4. Fundamental principles of digitization of documentary heritage. ЮНЕСКО, 2015. URL: http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/CI/CI/pdf/mow/digitization_guidelines_for_web.pdf (дата обращения: 14.03.2020).
5. Распоряжение Правительства РФ от 28 июля 2017 г. № 1632-р "Об утверждении Программы "Цифровая экономика Российской Федерации". URL: <http://government.ru/docs/28653/> (дата обращения: 16.03.2020).
6. Genius Marketing. Онлайн-образование: 7 ключевых трендов 2018 года. Genius Marketing Homepage. URL: <https://geniusmarketing.me/lab/onlajn-obrazovanie-7-klyuchevykh-trendov-2018-goda/> (дата обращения: 28.02.2019).
7. Демин И. С. Поиск научной и учебной информации в сети Интернет // Вестник ТГУ. 2008. № 9.
8. Avdoshin S. M., Pesotskaya E. Y., Chernov A. V. SuperBook Concept for a Digital University // Actual Problems of

System and Software Engineering. Proceedings of the 6th International Conference Actual Problems of System and Software Engineering. Moscow, Russia, 12–14 November, 2019. CEUR Workshop Proceedings, 2019. P. 248–258.

9. **Грин Н. В.** Интернет как средство обучения // Успехи современного естествознания. 2013. № 5. С. 59–61. URL: <http://www.natural-sciences.ru/ru/article/view?id=31672> (дата обращения: 16.02.2020).

10. **Coates H.** Student Engagement in Campus-Based and Online Education: University Connections. London, Routledge, 2006.

11. **Spyropoulou N., Karathanasis I. Pierrakeas C., Kameas A.** Clarifying the digital content output formats for mobile learning in higher education // International Conference on Interactive Mobile Communication Technologies and Learning (IMCL). 2014. DOI: 10.1109/IMCTL.2014.7011121.

12. **Garcia A. M.F., Esteban A. P.** Smart m-Learning Reusing Educational Contents. In: Pérez J. B. et al. (eds). Highlights in Practical Applications of Agents and Multiagent Systems. Advances in Intelligent and Soft Computing, 2011. Vol 89. Springer, Berlin, Heidelberg. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-19917-2_38.

13. **Gafurov I. R., Safiullin M. R., Elshin L. A.** Mechanisms of higher school development in the paradigm of its global competitiveness (on the example of the Kazan Federal University) // Investigación, Ciencia y Tecnología. 2017. N. 1. P. 1495. URL: https://repository.kpfu.ru/?p_id=171909.

14. **Ахметшин Э. М.** Тенденции и факторы цифровой трансформации университетов // Казанский экономический вестник. 2019. № 5 (43). С. 85–89.

15. **Holmberg B.** Distance Education and Languages: Evolution and Change. New Perspectives on Language and Education. Bristol: Multilingual Matters, 2005.

16. **Hanna D. E.** Organizational models in higher education, past and future. M. G. Moore & W. G. Anderson (eds.), Mahwah, nJ: routledge (2003).

17. **Cavus N.** Distance learning and learning management systems // Procedia-Social and Behavioral Sciences. 2015. Vol. 191. P. 872–877.

18. **Цифровой университет PwC.** URL: https://kpfu.ru/portal/docs/F_1147469203/PWC.digital.pdf (дата обращения: 14.03.2020).

19. **Попов Н. Н., Абрамов В. М., Абрамов В. А., Ткаченко Г. Н., Трунин С. В.** Разработка цифровой платформы для дистанционного обучения по дисциплинам университета // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 55.

20. **Чепенко Я. К.** Право и современная экономика: новые вызовы и перспективы // Сб. матер. II науч.-практ. конф.

с междунар. участием юридического факультета СПбГЭУ. 2019. С. 96–99.

21. **Курбацкий В. Н.** Цифровой след в образовательном пространстве как основа трансформации современного университета // ОБЩЕСТВЕННЫЕ НАУКИ: Народное образование. Педагогика. 2019. № 5. С. 40–45.

22. **Антонова Н. Айбатов А.** Особенности дистанционного обучения в вузах России // Научный электронный журнал "Меридиан". 2020. Вып. № 6(40).

23. **Шахов Ю. А., Виляев Д. А., Герасименко Т. Л.** Изменение системы образования под влиянием онлайн-технологий // Сб. "Влияние новейших технологий, СМИ и Интернета на образование, язык и культуру". По матер. Всеросс. науч.-практ. студенческой конференции. Москва, 2020. С. 261–267.

24. **Рожина Е. Ю., Селиванова И. В.** Об основных отличиях вузовского и школьного обучения и специфике обучения письменной речи в неязыковом вузе с учетом этих особенностей // Современное дополнительное профессиональное педагогическое образование. 2015. № 4 (4). С. 64–68.

25. **Зинина О. В., Оленцова Ю. А.** Проблемы вуза в эру дистанционных образовательных технологий и их решение // Балтийский гуманитарный журнал. 2020. Т. 9. № 1(30). С. 59.

26. **Бахарев Н. П.** Формирование интерактивного контента для дистанционного обучения студентов в высшей школе // Азимут научных исследований: педагогика и психология. 2019. Т. 8. № 3(28). С. 35. DOI: 10.26140/anip-2019-0803-0007.

27. **Крылова А. С.** Формирование ИКТ-компетентности в процессе реализации образовательной модели "Перевернутое обучение" // Academy. 2016. № 1 (4). С. 99–100.

28. **Луковцева В. Н., Кривошеева Е. Н.** Образование в высшей школе сегодня и завтра: дистанционное и онлайн обучение // Проблемы современного педагогического образования. 2018. № 61, ч. 1. С. 160–163.

29. **Howell S., O'Donnell B.** Digital Trends and Initiatives in Education: The Changing Landscape for Canadian Content. Government of Canada and Ontario Media Development Corporation, 2017. URL: <https://publishers.ca/wp-content/uploads/2019/03/DigitalTrendsandInitiativesinEducation.pdf> (дата обращения: 15.02.2020) (In English).

30. **Geoffrey G. Parker, Marshall W. Van Alstyne, Choudary, Sangeet Paul.** Platform Revolution: How Networked Markets Are Transforming the Economy and How to Make Them Work for You. Mann, Ivanov, Ferber, 2017.

S. M. Avdoshin, Ph.D., Professor,

School Head: School of Software Engineering / Faculty of Computer Science, e-mail: savdoshin@hse.ru,

A. V. Chernov, Tutor, Visiting scholar, School of Software Engineering / Faculty of Computer Science,
e-mail: achernov@hse.ru, Executive at Asitex.ru, chernov@asitex.ru,

E. Yu. Pesotskaya, Ph.D., Associate Professor, School of Software Engineering / Faculty of Computer Science,
e-mail: epesotskaya@hse.ru,

National Research University Higher School of Economics, Moscow, 101000, Russian Federation

Digital Content Service for the Distance Learning

Education is an important foundation on which any area of the modern world is built. The quality education allows students to get promising jobs, and employers to get more trained employees, to reach career goals and development plans. By "education" we understand more than the educational process. It is also the acquisition of various knowledge and skills during the electronic literature research and analysis. The article is devoted to the task of developing a concept and requirements for a new service for working with digital content that can overcome existing barriers to the use of digital content and establish convenient two-way communication between the author and the reader, and effectively complement existing and developing online education platforms. The suggested approach is based on an analysis of the needs and interests of all participants in the education market, taking into account the trends in the transformation of educational institutions and the formation of digital universities. These goals were achieved by designing a prototype of a digital content service appropriate for the distance learning so required nowadays.

Keywords: education, educational services, digital content, online education, transformation, digital university

References

1. **Abdrahmanova G. I., Vishnevskij K. O., Gohberg L. M., Dranev Yu. A., Zinina T. S., Kovaleva G. G., Lavrinenko A. S., Milshina Yu. V., Nazarenko A. A., Rudnik P. B., Sokolov A. V., Suslov A. B., Tokareva M. S., Turovets Yu. V., Filatova D. A., Chernogortseva S. V., Shmatko N. A.** What is a digital economy? Trends, competencies, measurement, Moscow, *XX April International Academic Conference On Economic and Social Development*, 2019, 85 p., available at: https://www.hse.ru/data/2019/04/12/1178004671/2_%20Цифровая_экономика.pdf (last accessed: 30.03.2020) (in Russian).
2. **Avdoshin S. M., Pesotskaya E. Y.** Development of P2P Educational Service in Russia, *Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC)*, 2019, vol. 2. Switzerland: Springer, 2020, pp. 833–847.
3. **Education** for a complex society, *Global Education Futures Report*, 2018, available at: <http://www.edutainme.ru/post/global-education-futures-report/> (last accessed 04.02.2020) (in Russian).
4. **Fundamental** principles of digitization of documentary heritage, *UNESCO digitization guidelines*, 2015, available at: http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/CI/CI/pdf/mow/digitization_guidelines_for_web.pdf (last accessed: 14.03.2020).
5. **Order** of the Government of the Russian Federation from 28 July 2017 № 1632-p "On approval of the Digital Economy of the Russian Federation Program", available at: <http://government.ru/docs/28653/> (last accessed: 16.03.2020) (in Russian).
6. **Online-education: 7 key trends of the year 2018**, *Genius Marketing Homepage*, available at: <https://geniusmarketing.me/lab/onlajn-obrazovanie-7-klyuchevyx-trendov-2018-goda/> (last accessed: 28.02.2019) (in Russian).
7. **Demin I. S.** The search of a scientific and academic information in the Internet, *Tomsk State University Journal*, 2008, no. 9.
8. **Avdoshin S. M., Pesotskaya E. Y., Chernov A. V.** Super-Book Concept for a Digital University, *Actual Problems of System and Software Engineering. Proceedings of the 6th International Conference Actual Problems of System and Software Engineering*, Moscow, Russia, 12–14 November, 2019, *CEUR Workshop Proceedings*, 2019. P. 248–258.
9. **Green N. V.** Internet as a mean of education, *Advances In Current Natural Sciences*, 2013, no. 5, pp. 59–61, available at: <http://www.natural-sciences.ru/ru/article/view?id=31672> (last accessed: 16.02.2020) (in Russian).
10. **Coates H.** Student Engagement in Campus-Based and Online Education: University Connections. London, Routledge, 2006.
11. **Spyropoulou N., Karathanasis I. Pierrakeas C., Kameas A.** Clarifying the digital content output formats for mobile learning in higher education, *International Conference on Interactive Mobile Communication Technologies and Learning (IMCL)*, 2014.
12. **García A. M.F., Esteban A. P.** Smart m-Learning Reusing Educational Contents, *Highlights in Practical Applications of Agents and Multiagent Systems. Advances in Intelligent and Soft Computing*, vol. 89. Springer, Berlin, Heidelberg https://doi.org/10.1007/978-3-642-19917-2_38.
13. **Gafurov I. R., Safiullin M. R., Elshin L. A.** Mechanisms of higher school development in the paradigm of its global competitiveness (on the example of the Kazan Federal University), *Investigación, Ciencia y Tecnología*, 2017, no. 1, p. 1495, available at: https://repository.kpfu.ru/?p_id=171909 (last accessed: 28.02.2019).
14. **Ahmetshin E. M.** Tendencies and factors of a universities digital transformation, *The Kazan Economic Vestnik*, 2019, no. 5(43), pp. 85–89.
15. **Holmberg B.** Distance Education and Languages: Evolution and Change. *New Perspectives on Language and Education, Bristol: Multilingual Matters*, 2005.
16. **Hanna D.** Organizational models in higher education, past and future. *M. G. Moore & W. G. Anderson (eds.), Mahwah, nJ: routledge*, 2003.
17. **Cavus N.** Distance learning and learning management systems. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2015, no. 191, pp. 872–877.
18. **Digital University PwC**, *Kazan federal university* available at: https://kpfu.ru/portal/docs/F_1147469203/PWC.digital.pdf (last accessed: 14.03.2020) (in Russian).
19. **Popov N. N., Abramov V. M., Abramov V. A., Tkachenko G. N., Trunin S. V.** Development of a digital platform for distance learning for the university disciplines, *Scientific notes RSHU (RGGMU)* 2019, no. 55 (in Russian).
20. **Chepenko Ya. K.** Law and modern economy: new challenges and perspectives. St. Petersburg, *II International Academic Conference on Law, SPBU*, 2019, pp. 96–99 (in Russian).
21. **Kurbatskiy V. N.** Digital trace in educational space as a basis of a modern university transformation, *Social Sciences: National Education. Pedagogy*, BSU, 2019, no. 5, pp. 40–45 (in Russian).
22. **Antonova N. Aybatova A.** Singularity of a distance learning in Russian universities, *Scientific electronic journal "Meridian"*, 2020, vol. 6(40), available at: <http://meridian-journal.ru/site/article?id=3240> (last accessed: 17.03.2020) (in Russian).
23. **Shakhov Yu. A., Vilyavin D. A., Gerasimenko T. L.** Educational system change influenced the online-technologies, Digest "Influence of modern technologies, Media and Internet on the education, language and culture" *International Academic Student Conference, Moscow*, 2020, pp. 261–267 (in Russian).
24. **Rozhina E. Yu., Selivanova I. V.** About general distinctions between college and school education and peculiarities of writing in a non-language college, *The online scientific and methodological journal modern additional pedagogical education*, 2015, no. 4 (4), pp. 64–68 (in Russian).
25. **Zinina O. V., Olentsova J. A.** University's problems in the era of distance learning Technologies and their solution, *Baltic Humanitarian Journal*, 2020, vol. 9, no. 1(30), p. 59 (in Russian).
26. **Bakharev N. P.** Formation of interactive content for distance learning of students at the higher school, *Azimuth of Scientific Research: Pedagogy and Psychology*, 2019, vol. 8, no. 3(28), p. 35. DOI: 10.26140/anip-2019-0803-0007 (in Russian).
27. **Krylova A. S.** Development of an ICT competencies in the process of a "flipped learning" education, *Academy Journal*, 2016, no. 1(4), p. 99–100, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-ikt-kompetentnosti-v-protseesse-realizatsii-obrazovatelnoy-modeli-perevernutoe-obuchenie> (last accessed: 04.03.2020) (in Russian).
28. **Lukovtseva V. N., Krivosheeva E. N.** Education in a higher school today and tomorrow: distance and online learning, *Problems of modern pedagogical education*, 2018, no. 61 (1), pp. 160–163.
29. **Howell S., O'Donnell B.** Digital Trends and Initiatives in Education: The Changing Landscape for Canadian Content, *Government of Canada and Ontario Media Development Corporation*, 2017, available at: <https://publishers.ca/wp-content/uploads/2019/03/DigitalTrendsandInitiativesinEducation.pdf> (last accessed: 17.02.2020).
30. **Parker Geoffrey G., Marshall W. Van Alstyne, Choudary, Sangeet Paul.** Platform Revolution: How Networked Markets Are Transforming the Economy and How to Make Them Work for You. *Mann, Ivanov, Ferber*, 2017.

И. В. Дымченко, ст. преподаватель, e-mail: ivdymchenko@sevsu.ru,
С. А. Кузнецов, ст. преподаватель, e-mail: sakuznetsov@sevsu.ru,
О. А. Сырых, ст. преподаватель, e-mail: sirih@mail.ru,
В. С. Яновская, магистрант, e-mail: VSYanovskaya@sevsu.ru,
Севастопольский государственный университет

Применение технологии виртуальной реальности и 3D-моделирования для цифровых реконструкций объектов культурного наследия¹

Описывается опыт создания виртуального тура по сельской усадьбе Хоры Херсонеса с применением технологии виртуальной реальности для платформы HTC Vive. Описаны аппаратные и программные средства и технологии, применявшиеся для создания 3D-моделей строений и предметов быта херсонеситов. Продемонстрированы особенности метода создания трехмерных моделей с помощью фотограмметрии в сравнении с методом, использующим сканер структурированного света на примере предмета посуды херсонеситов. Описаны программные инструменты, которые применялись для разработки виртуального тура. Разрабатываемая платформа может применяться для информатизации музейных комплексов, археологических исследований и учебно-образовательного процесса.

Ключевые слова: виртуальная реальность, цифровая реконструкция, Херсонес Таврический, 3D-модель, 3D-сканер, VR, Unity

Введение

Стратегия социально-экономического развития города Севастополя до 2030 г. определяет приоритетные направления развития для региона, среди которых особое место занимает туризм. Севастопольский регион обладает уникальными особенностями: географическое расположение, природно-климатические условия и богатейшее историко-культурное наследие, которое включает более тысячи объектов различных исторических объектов, обуславливают наличие уникальных музейных комплексов, а использование современных информационных технологий позволяет сделать их доступными для изучения более широкому кругу посетителей.

Одним из примеров уникальнейших памятников истории в г. Севастополе является Херсонес Таврический, который был включен в список всемирного наследия ЮНЕСКО как

объект "Древний город Херсонес Таврический и его хора", а также отнесен к особо ценным объектам культурного наследия народов Российской Федерации приказом президента.

На сегодняшний день территория Херсонеса — это музей, а также место археологических раскопок и исследований. Большое число остатков архитектурных сооружений расположены на территориях, которые подвергались воздействию и на которых в настоящее время ведется активная хозяйственная деятельность, так как территория Древнего Херсонеса — это и есть территория современного г. Севастополя. При освоении территорий возникает необходимостью проведения археологических исследований с последующим принятием решения о судьбе вскрытых объектов. Иногда требуется сделать выбор: либо поднять весь культурный слой и передать земельные участки под освоение, либо придать статус археологического памятника с последующей консервацией и, тем самым, запрещать любые виды деятельности на данных территориях. В первом случае все найденные артефакты и остатки сооружений должны быть задокументированы и должна быть найдена возможность их демонстрации.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке внутреннего гранта ФГАОУ ВО "Севастопольский государственный университет" в рамках научного проекта № 519/06-31.

Последнее при ограниченных площадях становится проблематичным. Многие из археологических находок представлены в действующих экспозициях Государственного историко-археологического музея-заповедника "Херсонес Таврический", но большая часть хранится в хранилищах и недоступна для посетителей.

Музей-заповедник "Херсонес Таврический" использует информационные технологии для представления своих экспозиций в сети Интернет. На официальном сайте музея представлены виртуальные выставки, которые предлагают текстовый и фотографический документальный материал, а также 3D-панорамы экспозиций, позволяющие увидеть зал экспозиции посетителям через сеть Интернет [1]. Такие выставки не в полной мере используют все возможности современных компьютерных технологий. Наиболее подходящими для создания виртуальных выставок и экскурсий на сегодняшний день являются технологии дополненной и виртуальной реальностей, которые включены в списки наиболее существенных [2] и основных сквозных цифровых технологий национальной программы "Цифровая экономика Российской Федерации", на основе которых должны создаваться новые цифровые инструменты. Под *дополненной реальностью* (augmented reality — AR) понимается добавление к элементам реального мира элементов цифрового мира, видоизменяющее пространство вокруг пользователя, под *виртуальной реальностью* (virtual reality — VR) понимают создание виртуальной среды вокруг пользователя с использованием шлемов виртуальной реальности [3]. Применение этих технологий для разработки виртуальных туров активно применяется в последние годы и тесно связано с технологиями 3D-моделирования для создания трехмерного контента.

Также особую роль играет применение VR-технологий и 3D-моделирования для вовлечения молодежи в изучение истории. Эти технологии позволяют смоделировать комфортные условия для получения новых знаний, а особенно — для обучения детей, подростков и молодежи. Поэтому разработанные VR-комплексы совместно с приложением виртуального тура по древним городам могут быть использованы на уроках истории и краеведения в школах.

Ранее группой разработчиков Севастопольского государственного университета было создано приложение-путеводитель по музейному комплексу Малахова кургана с использованием технологии AR. Благодаря этому проекту были отработаны методики создания 3D-моделей и их интеграция с приложением для ОС Android

[4]. Развитием опыта, полученного в этом проекте, стала разработка приложения с использованием технологии VR для реконструкции сельской усадьбы Хоры Херсонеса античного периода и создания виртуального тура.

1. Обзор VR-туров исторических реконструкций

На сегодня известно множество реализаций исторических 3D-реконструкций, выделим из них наиболее значимые, использующие технологию VR. Одним из таких проектов является Historium VR [5] — масштабное VR-приложение, которое позволяет пользователю посетить средневековый бельгийский город Брюгге. Пользователь получает возможность плавать, грести на лодке, летать и взаимодействовать с окружающими предметами, что позволяет полностью погрузиться в средневековую атмосферу. Приложение доступно для скачивания через платформу Steam для запуска на платформе HTC Vive.

Другой VR-проект дает возможность побывать в Древнем Риме [6]. Цель проекта — помочь узнать историю Древнего Рима. Пользователь может пролететь над городом, посетить реконструированные Пантеон, Базилику Максенция, Римский форум, Колизей, Императорский дворец. На сайте проекта доступны приложения VR-платформ Oculus Rift, Samsung GearVR, Oculus Go, HTC Vive.

Для мобильных платформ создано VR-приложение, которое позволяет пользователям посетить реконструкцию древнего города Иерусалима [7]. Экскурсия с использованием виртуальной реальности дает возможность пользователям увидеть город таким, каким он был около 2 тысяч лет назад, включая осмотр иерусалимских крепостей, дворцов и храмов периода царя Ирода.

2. Создание виртуального тура

Разработка виртуального тура по античной усадьбе — трудоемкая и технически сложная задача, которая не может быть решена с помощью шаблонных программных инструментов, а должна быть разработана квалифицированными IT-специалистами и дизайнерами при тесном взаимодействии с историками и археологами. Создание тура по античной усадьбе Хоры Херсонеса включало два основных крупных этапа: создание контента и разработку программного обеспечения.

Для реконструкции строений и предметов быта Херсонеса были изучены литературные источники и публикации [8, 9], из которых были получены представления о том, как выглядели предметы, а также получены чертежи и фотографии остатков строений усадеб наделов № 9 и № 25 Хоры Херсонеса, раскопки которых расположены на территории г. Севастополя. При разработке тура также был учтен опыт 3D-реконструкции зданий и строений Херсонеса [10].

2.1. Создание коллекций 3D-моделей

На этом этапе выполняется создание и/или воссоздание объектов для получения цифровых 3D-моделей, 2D-изображений, документов, описаний, звукового сопровождения.

Основную трудность на этом этапе обычно составляет разработка качественных трехмерных моделей, большая часть которых должна создаваться по чертежам и изображениям в 3D-редакторах. Однако существуют также методики получения фотореалистичных объектов реального мира с использованием технологий 3D-сканирования и фотограмметрии, которые необходимо применять для получения референсных моделей, для воссоздания реалистичного рельефа, планов помещений и непосредственно моделей археологических объектов усадьбы Хоры Херсонеса.

3D-сканирование. Для оцифровки небольших объектов применялся 3D-сканер Einscan-SE, который имеет в составе конструкции две видеокамеры, источник света, а также поворотный стол. В приборе используется технология сканирования с использованием структурированного света.

Основной принцип сканирования с использованием структурированного света состоит в проецировании специальным образом создаваемого двумерного изображения на объект и фиксации образа освещенного объекта. Источником освещения является проектор, который генерирует свет, структура которого меняется в соответствии с заданным шаблоном. В качестве датчика изображения используется видеокамера. Она используется для получения изображения освещенного объекта. Если объект является плоской поверхностью, то полученное изображение будет совпадать с шаблоном структуры проецируемого света. Однако, когда поверхность не плоская, геометрическая форма поверхности искажает проецируемый структурированный свет. Таким образом, 3D-сканирование с использованием структурированного света заключается в получении

трехмерной модели поверхности на основе информации об искажениях проецируемого структурированного света. Точные контуры поверхности объектов в сцене могут вычисляться с использованием различных методик и алгоритмов [11].

С помощью программного обеспечения Einscan-S series можно получать 3D-модели объектов в виде облаков точек, а также преобразовывать их в полигональные модели. Характеристики 3D-сканера Einscan-SE представлены ниже.

Разрешение камеры	1.3 MPix
Число камер	2
Источник света	белый свет
Режим сканирования	фиксированный, автоматический
Минимальная область сканирования, мм	30 × 30 × 30
Максимальная область сканирования (автоматический режим), мм	200 × 200 × 200
Максимальная область сканирования (фиксированный режим), мм	700 × 700 × 700
Скорость 3D-сканирования (фиксированный режим), с	8
Скорость 3D-сканирования (автоматический режим), мин	2
Расстояние до объекта, мм	290...480
Точность сканирования, мм	0,1
Формат данных	OBJ, STL, ASC, PLY

В ходе работ по сканированию объектов в фондохранилище государственного историко-археологического музея-заповедника "Херсонес Таврический" были определены следующие факторы, которые влияют на полученный результат:

- свет окружающей среды. Идеальным освещением при работе с 3D-сканером является нормальное дневное освещение с единственным искусственным источником света — проектором сканера;
- материал и цвет объекта. Наиболее подходящим объектом для сканирования является объект с матовой непрозрачной поверхностью. При сканировании блестящих или отражающих поверхностей возникает проблема полного отражения света проектора от объекта. Не рекомендуется сканировать объекты, у которых зеркальные, стеклянные, прозрачные, блестящие и металлические поверхности;
- форма объекта. Проще всего сканировать объекты, имеющие сопоставимые размеры по всем трем направлениям.

Таким образом, с помощью сканера Einscan-SE были получены текстурированные модели объектов, которые имеют небольшие размеры, такие как предметы быта и посуда (канфары, скифос, ключ-кольцо, светильник и чаша). На каждый из предметов потребовалось от 20 до 80 кадров в зависимости от сложности формы сканируемого предмета. И поскольку создать идеальные условия для сканирования было практически невозможно, на некоторых моделях отсутствовали точки и полигоны. Для восстановления таких моделей применялся редактор 3D-моделей Blender.

Фотограмметрический метод. Для более крупных объектов, размеры которых выходят за допустимые границы сканера, был использован фотограмметрический метод, в котором для построения моделей используются фотографии объекта. Съемка объектов проводилась со всех сторон под разным углом, перекрытие зон фотографирования на каждом последующем снимке было не менее 70 %. Последующая обработка фотографий и построение модели выполнялась в специализированном программном обеспечении Agisoft Photoscan. Методика построения моделей данным способом была разработана командой при создании AR-приложения для музейного комплекса Малахов курган и подробно описана в работе [4].

В результате методом фотограмметрии было создано пять моделей предметов быта Хоры Херсонеса и две модели склепов.

Создание моделей по чертежам. Разработка моделей зданий, строений и объектов быта, которые не сохранились в первозданном виде, возможно только с использованием документальных материалов: чертежей, описаний, рисунков. В этом случае используется метод моделирования с использованием 3D-редакторов.

Моделирование в данном случае представляет собой процесс создания сцен, состоящих из объектов, виртуальных источников света, видеокамер. Моделям может быть назначена текстура, т.е. с каждым объектом связывается информация, отвечающая за свойства объекта, — цвет, фактура, возможность отражать объекты, прозрачность и др. Каждая сцена может быть визуализирована — превращена в графический файл для ее дальнейшего использования.

Процесс построения цифрового двойника сельской усадьбы надела № 9 состоял из следующих этапов:

- на основании референсных чертежей, описаний и фотографии останков фундаментов были отрисованы схемы усадьбы и внутренних помещений;

- выполнены перенос и реализация схемы в среде трехмерного моделирования Blender;
- проведено моделирование стен и зданий в среде Blender с использованием трехмерных примитивов (рис. 1);
- скорректировано расположение стен строений и внутренних помещений усадьбы по планам усадьбы и фотографиям фундамента;
- выполнены подбор и наложение текстур на поверхности модели усадьбы (рис. 2);
- модель сохранена в формате *.fbx для дальнейшего использования в среде Unity при создании виртуальной экскурсии по сельской усадьбе Хоры Херсонеса.

Помимо модели усадьбы данным методом были созданы более десяти объектов быта античного периода, такие как амфоры, посуда, мебель, очаг, и воссозданы объекты античных виноделен — тарапаны, пресс и сосуды для хранения вина. Использование этих моделей в дальнейшем позволит полностью показать виртуальный процесс изготовления вина в античный период.

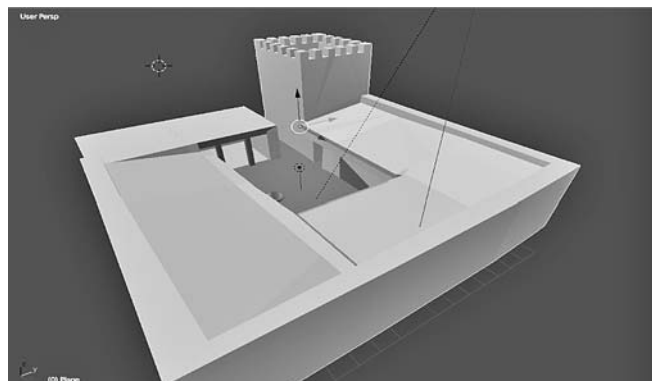


Рис. 1. Воссоздание базовой модели строений усадьбы Хоры Херсонеса в среде Blender

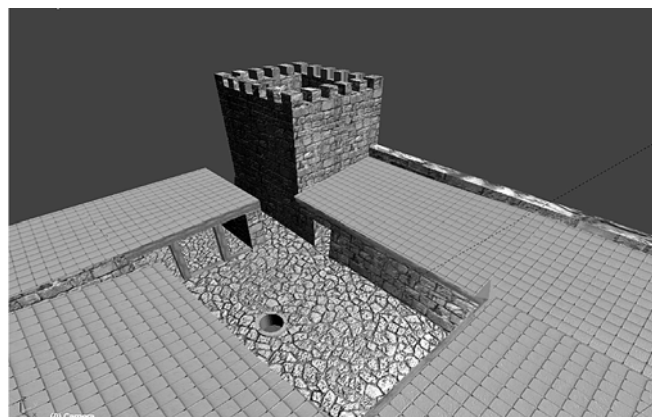


Рис. 2. Текстурированная модель здания усадьбы Хоры Херсонеса в среде Blender

2.2. Сравнение методов создания моделей с помощью фотограмметрии и с использованием сканера структурированного света

Для анализа был выбран предмет античной посуды — частично восстановленный чернолаковый канфар (сосуд для питья вина), найденный на раскопках Херсонеса.

Было выполнено его фотографирование с разных ракурсов с помощью цифровой фотокамеры D5300 и получены 153 фотоснимка. Для обработки фотоснимков и построения плотного облака точек и полигональной модели использовалось программное обеспечение

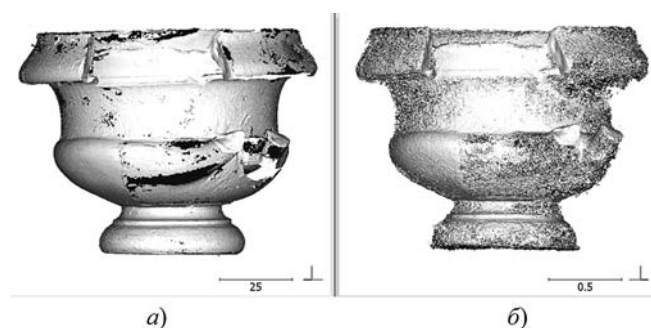


Рис. 3. Точечные модели канфара, полученные: а — методом сканирования; б — фотограмметрическим методом

Таблица 1

Параметры облаков точек, полученных разными методами

Метод получения облака точек	Число точек	Размеры модели
Сканирование	3 264 470	X: 103,509 Y: 107,852 Z: 78,3428
Фотограмметрия	3 162 167	X: 2,00572 Y: 2,0783 Z: 1,52749



Рис. 4. Облако точек, полученное фотограмметрическим методом, со значениями расстояний ее точек от опорного облака точек, полученного со сканера

Agisoft Photoscan и опробованная ранее методика обработки [4].

С использованием сканера Einscan-SE было выполнено сканирование объекта с применением поворотного стола и получены 72 скана, на базе которых было построено облако точек и полигональная модель в фирменном программном обеспечении сканера Einscan-S series.

Сравнение точечных моделей. Были получены облака точек с ориентированными нормальными, с применением фотограмметрического метода и метода сканирования структурированным светом. Затем облака были отредактированы для удаления лишних деталей, не относящихся к объекту моделирования (рис. 3). Параметры облаков точек приведены в табл. 1.

Результат сканирования в точности соответствует размерам реального объекта в миллиметрах, а модель, полученная фотограмметрическим методом, сохранила пропорции объекта, но требует масштабирования для совпадения размеров с реальным объектом. В обеих моделях есть места с отсутствующими точками поверхности, которые при дальнейшем восстановлении полигональной сетки будут заполнены при программной обработке. Несмотря на приблизительно равное число точек в обеих моделях визуально модель, полученная с использованием сканера, выглядит точнее и может быть эталонной в ходе дальнейшего сравнения.

Далее выполняется выравнивание этих облаков точек с помощью инструмента Align программного обеспечения CloudCompare и анализируется расстояние между облаками точек. В качестве опорного выбирается облако точек сканера. Для точного выравнивания была использована реализация итеративного алгоритма ближайших точек — ICP из CloudCompare [12].

После сравнения двух облаков путем вычисления расстояния точек сравниваемого облака до точек опорного облака (рис. 4) было получено максимальное значение расстояния 11,1 мм, среднее значение 0,9 мм.

Наибольшие расстояния достигались в тех местах, где отсутствовали точки в опорной модели. На участках с плотным расположением точек в обеих моделях расхождение достигало не более 1 мм, что говорит также о хорошем соответствии фотограмметрической модели реальному объекту.

Сравнение полигональных моделей. На основе точечных моделей программное обеспечение (Agisoft Photoscan для фотограмметрического метода и Einscan-S series для сканирования) позволяет получить и полигональные модели, которые в дальнейшем могут использоваться как трехмерный контент в приложе-

Таблица 2

Параметры полигональных моделей,
полученных разными методами

Метод получения	Число полигонов	Размеры модели
Сканирование (Einscan-S series)	1 829 975	X: 102,698 Y: 113,544 Z: 77,4564
Фотограмметрия (Agisoft Photoscan)	306 004	X: 1,95631 Y: 2,04088 Z: 1,49455

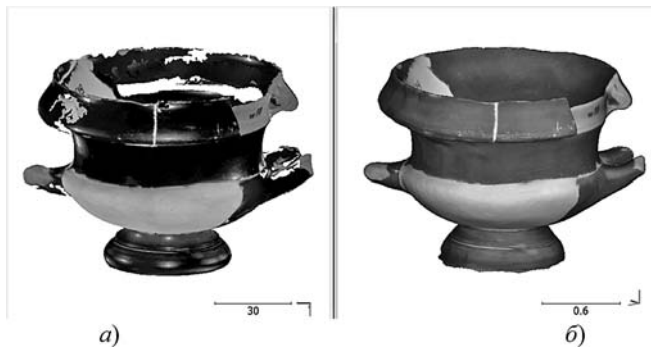


Рис. 5. Полигональные модели канфара, полученные:
а — методом сканирования и программой Einscan-S series;
б — фотограмметрическим методом и программой Agisoft Photoscan

нии виртуального тура. Параметры исходных полигональных моделей приведены в табл. 2.

В результате предварительного редактирования и выравнивания двух моделей с использованием CloudCompare аналогично точечным моделям были получены две полигональные сетки, представленные на рис. 5.

Как видно, модель, полученная фотограмметрическим способом, имеет меньшее число полигонов, что объясняется алгоритмом восстановления полигональной сетки и ее последующей дополнительной оптимизацией в программе Agisoft Photoscan. Также в этой программе выполняется автоматическое заполнение поверхности, поэтому фотограмметрическая модель не имеет отверстий. При использовании Einscan-S series не имеется возможностей для упрощения моделей, поэтому модель со сканера имеет большее число полигонов и при этом присутствуют отверстия в тех местах, где информация о поверхности не была получена при сканировании. Следовательно модель, полученную при сканировании (рис. 5), требуется еще дорабатывать в трехмерных редакторах (Blender, Meshlab) для соответствия реальному объекту.

Однако нужно отметить, что выбранный объект — сложный для сканирования с использованием сканера Einscan-SE, так как на нем присутствуют абсолютно черные, белые и

глянцевые поверхности. Сканирование объектов, которые не имеют этих проблем, приведет к лучшему качеству получаемой полигональной модели, и последующая доработка модели может не потребоваться.

Максимальное расстояние между моделями достигает 6,7 мм (рис. 6), что может быть вызвано различиями в исходных облаках точек и работой алгоритмов восстановления поверхностей в программном обеспечении.

Сравнение параметров рабочего процесса по созданию моделей. Далее приведена последовательность этапов, которые нужно выполнить для построения моделей с использованием сканера структурированного света Einscan-SE и с помощью фотограмметрического метода. В табл. 3 и 4 также приведены время и требования к выполнению всех этапов на примере выполнения работ для чернолакового канфара.

При сканировании выполняются следующие этапы:

1. Калибровка.

Этот этап выполняется один раз при первоначальной настройке сканера по инструкции

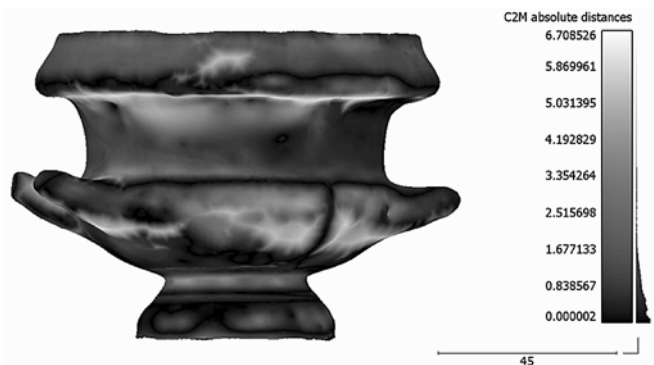


Рис. 6. Полигональная модель, полученная фотограмметрическим методом, со значениями расстояний ее поверхности от поверхности опорной полигональной модели со сканера

Таблица 3

Этапы, выполняемые при построении модели
с использованием сканера структурированного света

Этап	Требования	Длительность
Сканирование	Нет особых требований	Около 60 мин
Обработка сканов и построение текстурированной модели	Хорошие вычислительные ресурсы компьютера; знание программного обеспечения	Около 30 мин
Экспорт модели	Нет особых требований	5 мин
Доработка модели (если реальный объект сложен для сканирования)	Владение программным обеспечением для редактирования и оптимизации моделей	От 30 мин (в зависимости от сложности)

Таблица 4

**Этапы выполняемые при построении модели
фотограмметрическим методом**

Этап	Требования	Длительность
Фотосъемка	Знание принципов фотосъемки для построения моделей по фотограмметрическому принципу	Около 30 мин
Обработка фотографий и построение текстурированной модели	Хорошие вычислительные ресурсы компьютера; знание программного обеспечения	Около 5 ч
Экспорт модели	Нет особых требований	5 мин

из программного обеспечения Einscan-S series. При выполнении работы больше его выполнять не нужно.

2. Сканирование для получения сканов объекта.

Этап выполняется в полуавтоматическом режиме, в котором оператор задает настройки процесса и контролирует нормальную работу сканера.

3. Обработка сканов.

Выполняется автоматически или с помощью оператора. Например, если не работает автоматический алгоритм регистрации сканов, можно вручную выровнять облака по заданным общим точкам.

4. Экспорт модели.

Выполняется для последующей обработки в редакторах полигональных моделей, либо для использования в приложениях.

5. Доработка модели выполняется, если экспортированная модель не удовлетворяет требованиям приложения по качеству.

Этапы работ, выполняемые при создании модели фотограмметрическим способом, описаны в работе [4].

Выводы

1. Сканирование с помощью сканера структурированного света Einscan-SE позволяет получить трехмерные модели с точным соответствием размеров реальному объекту, а фотограмметрический метод не позволяет оценить размеры объекта без использования дополнительной информации. Следовательно, сканирование должно применяться там, где нужно получить точную информацию о размерах объекта, например, при создании цифровых копий археологических находок, которые могут потом также использоваться как референсные модели для других методов моделирования. Если соответствие размеров объекта не имеет

принципиального значения, можно применять фотограмметрический метод.

2. При сканировании объектов без глянцевых, а также без белых и черных поверхностей предпочтительнее использование сканера, так как процесс получения трехмерной модели этого объекта будет быстрее, чем при фотограмметрическом методе.

3. Фотограмметрический метод более универсален для построения моделей, поскольку он не зависит от физических размеров объекта и может применяться для объектов, к которым затруднен доступ или которые имеют размеры, не подходящие под ограничения сканера. При этом построение качественной модели существенно зависит от уровня подготовки оператора, выполняющего фотографирование, обработку фотографий и построение модели.

Можно сделать вывод, что в задачах цифровой реконструкции объектов историко-культурного наследия можно применять методы построения моделей с использованием сканера структурированного света и фотограмметрический метод в соответствии с их особенностями. Эти методы позволяют получить фотореалистичные модели реальных объектов для дальнейшего использования в приложении виртуального тура и для создания цифровых двойников исторических находок.

2.3. Выбор архитектуры приложения виртуального тура и средств разработки

Активное развитие и использование технологии виртуальной реальности сегодня дает большое разнообразие инструментов для создания виртуальных пространств, в том числе виртуальных экспозиций и туров. Максимальный эффект погружения достигается при использовании специализированных аппаратно-программных комплексов виртуальной реальности, основной частью которых является шлем с очками и наушниками, а также манипуляторы. На сегодняшний день одним из лидеров этой индустрии является фирма HTC, производящая современные комплексы виртуальной реальности HTC Vive.

Разработка приложения виртуального тура выполнялась для VR-комплекса HTC Vive. С учетом имеющегося опыта разработки, а также участия в разработке студентов можно отметить, что платформа Unity3D имеет преимущества над остальными средствами по доступности, удобности, надежности.

Таким образом был выбран следующий стек программных средств разработки:

1. Интегрированная среда разработки Unity, которая предоставляет все необходимые возможности для создания современного приложения с использованием технологии виртуальной реальности движка Unity3D.

Основными преимуществами разработки на Unity являются:

- удобный интерфейс и процесс разработки;
- наличие огромной библиотеки ассетов и плагинов, с помощью которых можно значительно ускорить процесс разработки сложных сцен;
- поддержка большого числа платформ, технологий, API;
- разрабатываемые приложения можно легко экспортировать между ОС Windows, Linux, OS X, Android, iOS.

2. SteamVR — программное обеспечение для работы с оборудованием виртуальной реальности.

3. Плагин SteamVR для Unity, который дает возможность использовать функционал библиотек SteamVR из среды разработки Unity.

4. Библиотека OpenVR SDK — программный интерфейс (API) и среда выполнения, позволяющие получить доступ к оборудованию виртуальной реальности от разных поставщиков.

5. VRTK — набор полезных скриптов и концепций, помогающих быстро и легко создавать приложения виртуальной реальности в Unity3D, предоставляющий возможности для программирования:

- перемещений в виртуальном пространстве;
- взаимодействий: прикосновение, захват и использование объектов;
- взаимодействий с элементами пользовательского интерфейса Unity3D с помощью указателей или прикосновений;

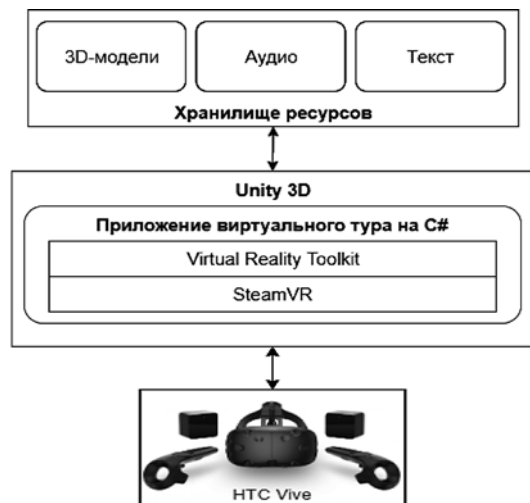


Рис. 7. Архитектура приложения для VR-платформы HTC Vive

- физических моделей тела в виртуальном пространстве;
- 2D- и 3D-элементов управления (кнопки, рычаги, двери, ящики и т.д.).

Архитектура приложения виртуального тура приведена на рис. 7.

2.4. Создание сцен виртуального тура

Виртуальный тур по усадьбе представляет собой интерактивное приложение с возможностью посещения нескольких локаций:

1. Стартовая сцена — стартовая локация, в которой находится пользователь сразу после запуска приложения. В ней пользователю доступно меню, из которого можно попасть в любую другую локацию виртуального тура. Окружение сцены — это территория городища Херсонеса в настоящее время со звуковым сопровождением шума моря и голосами чаек.

2. Сцена 1. Пользователь перемещается ко входу в усадьбу и может осмотреть строение усадьбы снаружи.

3. Сцена 2. Пользователь находится во дворе усадьбы и может попасть в различные внутренние помещения: башню, винодельню, хозяйственные и жилые помещения. На этой сцене пользователю доступна голосовая информация об усадьбе из аудиогuida.

4. Сцена 3. Пользователь, перемещаясь внутри усадьбы, попадает в помещение винодельни, в которой расположены пресс и тарапаны для производства вина, которыми пользовались херсонеситы. Для пользователя доступен аудиогид, в котором описываются основные виды винодавильного оборудования и процессы производства вина в Херсонесе.

5. Сцена 4. Из винодельни можно переместиться в винный склад, который находится под навесом и в котором в амфорах и пифосах хранилось производимое вино.

6. Сцена 5. Кухонное помещение (модель представлена на рис. 8), в которое можно попасть, перемещаясь по усадьбе. Посетитель



Рис. 8. Реконструированная модель кухонного помещения античной усадьбы



Рис. 9. Реконструированная модель трапезной античной усадьбы

может ознакомиться с предметами быта и посудой, которую использовали херсонеситы. Посуда является динамическими объектами, т.е. есть возможность взять и рассмотреть объект со всех сторон.

7. Сцена 6. Складское помещение. Рядом с кухней находится помещение, которое использовалось для хранения продовольственных запасов и хозяйственных предметов.

8. Сцена 7. Башня. Башня усадьбы античного периода имеет три этажа. На втором этаже башни находится трапезная (модель представлена на рис. 9), которая использовалась для приема пищи херсонеситами. Пользователь также может по лестнице подняться на третий этаж и крышу башни.

9. Сцена 8. Пользователь может оказаться внутри склепов некрополя Херсонеса и изучить расположение мест захоронения жителей Херсонеса.

3. Результаты и перспективы

В результате выполнения проекта по созданию виртуального тура усадьбы группой разработчиков, состоящей из преподавателей и студентов Севастопольского государственного университета, были реализованы следующие этапы работы:

- реконструирована 3D-модель сельскохозяйственной усадьбы хоры Херсонеса, воссозданы более 15 предметов быта и предметов посуды, которыми пользовались жители усадьбы;
- проанализированы археологические документы и описания и для каждой модели подготовлено текстовое описание, которое помогает пользователю в изучении быта древнего Херсонеса;
- созданы виртуальные модели с применением технологии фотограмметрии, 3D-ска-

нирования и создания моделей по планам и фотографиям с использованием 3D-редакторов. Также использовалось оборудование: 3D-сканер Einscan-SE, фотокамера Nikon D5300, и программное обеспечение: 3D-редактор Blender, программное обеспечение для создания моделей фотограмметрическим методом Agisoft Photoscan, для редактирования и оптимизации 3D-моделей MeshLab, CloudCompare;

- на основе литературных описаний и в сотрудничестве с работниками государственного историко-археологического музея-заповедника "Херсонес Таврический" подготовлены тексты и записаны материалы аудиогид на двух языках (русском и английском) с использованием записывающего оборудования — рекордера Zoom H1n и программного обеспечения Audacity;
- создана программная платформа на базе технологии виртуальной реальности и движка Unity3D, которая позволяет создавать приложения виртуальных туров для аппаратного комплекса HTC Vive. Для разработки использованы программные продукты Unity, SteamVR, VRTK;
- разработано приложение виртуального тура по сельской усадьбе Хоры Херсонеса античного периода, которое использует модели реконструированных строений и предметов быта древнего Херсонеса со сценами внутренних помещений усадьбы и склепа херсонесского некрополя, материалы текстовых описаний и аудиогид.

Освоенные в ходе выполнения проекта методики создания 3D-моделей дают возможность создавать банк цифровых двойников не только объектов культурного наследия, но и археологических находок, что может быть важно для решения задач автоматизации и цифровизации процесса археологических исследований с применением современных информационных технологий.

Разработанная программная платформа и приложение виртуального тура по сельскохозяйственной усадьбе Хоры Херсонеса может стать основой для создания современных виртуальных экспозиций, которые позволят:

- ознакомиться с уникальными экспонатами музея с максимальным эффектом погружения в атмосферу античного Херсонеса;
- привлечь новые туристические потоки;
- популяризировать интерес к истории и археологии среди молодежи;
- дать возможность изучения экспонатов для людей из маломобильных групп населения.

Список литературы

1. **Виртуальные** выставки — Государственный историко-археологический музей-заповедник "Херсонес Таврический". URL: https://chersonesos-sev.ru/?page_id=8894 (Дата обращения: 10.11.2019).
2. **The Essential** Eight technologies: PwC. URL: <https://www.pwc.com/gx/en/issues/technology/essential-eight-technologies.html> (Дата обращения: 20.11.2019).
3. **Иванова А.** Технологии виртуальной и дополненной реальности: возможности и препятствия применения // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018. Вып. 3 (106). С. 88—107.
4. **Дымченко И. В., Кузнецов С. А., Сырых О. А.** Создание 3D-контента и разработка мобильного приложения с технологией дополненной реальности для музейной экспозиции "Малахова кургана" // Информатизация образования и науки. 2019. № 2 (42). С. 47—66.
5. **Historium VR** — Virtual Reality. URL: <http://historiumvr.com/> (Дата обращения: 21.11.2019).
6. **Rome Reborn** — Home. URL: <https://www.romereborn.org/> (Дата обращения: 21.11.2019).

7. **Smithsonian** — See the Ancient World Through Virtual Reality URL: <https://www.smithsonianmag.com/innovation/see-ancient-world-through-virtual-reality-180962237/> (Дата обращения: 21.11.2019).

8. **Стрелецкий С. Ф.** Клеры Херсонеса Таврического // Херсонесский сборник. 1961. Вып. VI. С. 1—247.

9. **Смекалова Т. Н., Кецо Р. С., Гарипов А. С., Пасуманский А. Е.** Загородная усадьба как экономическая и социальная единица Дальней Херсонесской хоры // Вестник Российского гуманитарного научного фонда. 2016. № 1(82). С. 42—60.

10. **Хапаев В. В., Бацура И. В.** Компьютерная 3D реконструкция античного и средневекового города Херсонес Таврический: опыт, проблемы и перспективы // Историческая информатика. 2018. № 4. С. 39—56.

11. **Geng J.** Structured-light 3d surface imaging: a tutorial // Advances in Optics and Photonics. 2011. Vol. 3, N. 2. P. 128—160.

12. **Besl P. J., McKay N. D.** A Method for Registration of 3-D Shapes // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1992. Vol. 14, N. 2. P. 239—256.

I. V. Dymchenko, Senior Lecturer, e-mail: ivdymchenko@sevsu.ru,

S. A. Kuznetsov, Senior Lecturer, e-mail: sakuznetsov@sevsu.ru,

O. A. Syrykh, Senior Lecturer, e-mail: sirih@mail.ru,

V. S. Yanovskaya, Master Student, e-mail: VSYanovskaya@sevsu.ru,

Department of Information Systems, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University", Sevastopol, Russian Federation

Virtual Reality and 3D Modeling Technologies for Digital Reconstruction of Cultural Heritage Objects

The paper describes the experience of creating a virtual tour of the estate of Chora Chersonesos using virtual reality technology for the HTC Vive platform. The hardware and software tools and technologies used to create 3D models of buildings and household items of Chersonesites are described. The features of the method of creating three-dimensional models using photogrammetry are demonstrated in comparison with the method using a structured light scanner using the example of a dishware of Chersonesites. The software tools that were used to develop a virtual tour are described. The developed platform can be used for the informatization of museum complexes, archaeological research and the educational process.

Keywords: virtual reality, reconstruction, Tauric Chersonesos, 3D model, 3D scanner, VR, Unity

DOI: 10.17587/it.26.538-547

References

1. **Virtual** exhibitions — State Historical and Archaeological Museum-Reserve "Tauric Chersonesos", available at: https://chersonesos-sev.ru/?page_id=8894 (Date of access: 11/10/2019).
2. **The Essential** Eight technologies: PwC, available at: <https://www.pwc.com/gx/en/issues/technology/essential-eight-technologies.html> (Date of access: 11/20/2019) (in Russian).
3. **Ivanova A.** Technologies of virtual and augmented reality: possibilities and obstacles of application, *Strategic decisions and risk management*, 2018, vol. 3 (106), pp. 88—107.
4. **Dymchenko I. V., Kuznetsov S. A., Syrykh O. A.** The creation of 3D content and the development of a mobile application with augmented reality technology for the museum exposition "Malakhov Kurgan", *Informatization of education and science*, 2019, vol. 2 (42), pp. 47—66 (in Russian).
5. **Historium VR** — Virtual Reality, available at: <http://historiumvr.com/> (Date of access: 11.21.2019).

6. **Rome Reborn** — Home, available at: <https://www.romereborn.org/> (Date of access: 11.21.2019).

7. **Smithsonian** — See the Ancient World Through Virtual Reality, available at: <https://www.smithsonianmag.com/innovation/see-ancient-world-through-virtual-reality-180962237/> (Date of access: 11/21/2019).

8. **Strzheletsky S. F.** Clovers of Tauric Chersonesos, *Chersonesos collection*, 1961, vol. VI, pp. 1—247 (in Russian).

9. **Smekalova T. N., Ketsko R. S., Garipov A. S., Pasumansky A. E.** Country estate as an economic and social unit of the Far Chersonesus Choir, *Bulletin of the Russian Humanitarian Scientific Foundation*, 2016, vol. 1 (82), pp. 42—60 (in Russian).

10. **Хапаев В. В., Батура И. В.** 3D computer reconstruction of the ancient and medieval city of Tauric Chersonesos: experience, problems and prospects, *Historical Informatics*, 2018, vol. 4, pp. 39—56 (in Russian).

11. **Geng J.** Structured-light 3d surface imaging: a tutorial, *Advances in Optics and Photonics*, 2011, vol. 3, no. 2, pp. 128—160.

12. **Besl P. J., McKay N. D.** A Method for Registration of 3-D Shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, vol. 14, no. 2, pp. 239—256.

М. А. Нечухаев, зам. директора Департамента оперативного управления и мониторинга,
ПАО НК "Роснефть", Москва,
В. В. Чепкасов, первый зам. ген. директора,
ОАО "Удмуртнефть", г. Ижевск,
Н. О. Вахрушева, канд. техн. наук, начальник управления
по технологическому развитию, e-mail: NOVahrusheva@udmurtneft.ru,
ЗАО "Ижевский нефтяной научный центр", г. Ижевск

Совершенствование бизнес-процесса обслуживания скважин с помощью цифровых технологий

Обсуждается реализация проектов по цифровизации месторождений нефтегазовыми предприятиями России. Предприятия используют технологию цифровых двойников для моделирования и прогнозирования сценариев оптимизации разработки месторождений и технологических процессов эксплуатации месторождений. Процессы цифровизации детально разобраны в статье, выявлены недостатки и возможности для их улучшения. Рассмотрены три режима управления скважиной с использованием искусственного интеллекта. Разработана концепция всех возможных режимов. Выявлена экономическая целесообразность реализации проекта по внедрению цифровых технологий в процесс обслуживания скважин на примере месторождений ОАО "Удмуртнефть". Рассчитан предполагаемый экономический эффект. Выполнен расчет дополнительной численности требуемого персонала для достижения заданных показателей проекта при снижении времени реагирования.

Ключевые слова: цифровизация месторождений, цифровая скважина, автоматизация, обслуживание скважины, эффективность цифровизации, Удмуртнефть

Введение

Уровень добычи нефти в России в 2018 г. составил 555,9 млн т — это рекордный показатель за последние десятилетия, отмечается в обзоре нефтесервисного рынка Deloitte (2019). Рост по отношению к предыдущему году составил 1,7 %. При этом затраты на капитальный ремонт скважин выросли на 49 % по сравнению с 2017 г. [1]. В процессе эксплуатации месторождений наибольшая доля операционных затрат приходится на процесс добычи (рис. 1, см. вторую сторону обложки). Поэтому задача снижения затрат на обслуживание скважины как главного элемента процесса добычи — сегодня одна из ключевых для нефтегазовых компаний.

Постановка задачи исследования

Крупнейшие нефтегазовые предприятия России реализуют проекты по цифровизации месторождений [1], используя технологию цифровых двойников для моделирования и прогнозирования сценариев оптимизации разработки месторождений и технологических процессов эксплуатации месторождений.

В данной статье под *цифровизацией* будем понимать применение прорывных технологий, преобразующих операционные процессы и бизнес-модели за счет использования искусственного интеллекта, мобильных устройств, роботизации и интеграционных технологических платформ [2]; под *цифровым двойником* будем понимать цифровую копию физического объекта или процесса, помогающую оптимизировать эффективность бизнес-процессов [3].

Проекты "цифровое месторождение", "умное месторождение", "электронное месторождение" внедряют соответственно Роснефть (Илишевское месторождение), Лукойл (Южный Ягун), Газпромнефть-Хантос (Приобское месторождение (южная лицензионная территория)) и другие предприятия нефтегазодобычи. Применение цифровых технологий для совершенствования работы скважины во всех проектах является одной из главных задач.

Несмотря на то, что на территории России предлагаются к реализации готовые решения по цифровизации работы скважин, например,

- продукт "интеллектуальная скважина" — разработка группы компаний "Новомет" (автоматическая адаптивная настройка оптимального режима работы установки электроприводного центробежного насоса для

текущих условий эксплуатации и обеспечение работы насоса) [4];

- проект "цифровая скважина", который реализуется на оборудовании пермской компании "Россма" с использованием программного обеспечения "Ростелеком" (позволяет предотвращать аварийную остановку скважин) [5] и др.;

однозначных типовых, признанных технологий для цифровизации нет.

Предположительно это связано с тем, что выбор концепции и технологии цифровизации рассматривается нефтегазодобывающими предприятиями как конкурентное преимущество. При выборе концепции необходимо учитывать особенности и опыт эксплуатации конкретного месторождения: разницу в геологических условиях, географическом местоположении; обеспеченность инфраструктурой, ресурсами; безопасность и экологичность эксплуатации и производительность как отдельных скважин, так и месторождения в целом. Поэтому все крупнейшие компании на сегодняшний день ориентируются на разработку собственных концепций цифровизации, алгоритмов интеллектуального управления и программного обеспечения.

В настоящей статье рассматриваются основные задачи и экономическая целесообразность реализации проекта по внедрению цифровых технологий в процесс обслуживания скважин на примере месторождений ОАО "Удмуртнефть".

Метод решения задачи исследования

Для совершенствования бизнес-процесса обслуживания скважин с помощью цифровых технологий провели анализ текущей ситуации.

Процесс "как есть". Для анализа текущей ситуации и оптимизации производственных процессов на месторождениях ОАО "Удмуртнефть" были изучены процессы, связанные с эксплуатацией скважин как основным элементом технологического процесса добычи нефти. Описаны существующие процессы, выявлены недостатки и возможности для их улучшения.

В ОАО "Удмуртнефть" входят 34 нефтяных месторождения, расположенных на территории Удмуртской республики. Это 5651 скважина, 42 объекта, которые обслуживаются 42 бригадами: 476 операторами и 758 единицами техники. Сбор информации осуществляется по

скважинам, расположенным друг от друга на расстоянии от 1 до 30 км, в условиях бездорожья (зимний период и паводок). Время на обход и сбор информации со скважины занимает от 4 до 10 ч. На каждого оператора приходится 12 скважин и 1 объект.

Существует целый ряд проблем при обслуживании скважин: на обход всего фонда скважин по месторождению у одного оператора уходит порядка 1...3 дней. Замеряемость фонда скважин составляет 57 %. Ежедневно один оператор тратит на замер фонда скважин от 2 до 8 ч. При этом телеметрия на основном фонде скважин и передача данных на ПК отсутствует. Уровень оснащения скважин системами телемеханизации: 57 % — добывающий фонд; 26 % — нагнетательный фонд. Способ сбора данных — неудовлетворительный; большая разбросанность фонда, некустовое расположение скважин.

На сегодняшний день процесс обслуживания скважин состоит из этапов, представленных на рис. 2 (см. вторую сторону обложки).

Красным цветом на горизонтальной оси отмечены операции сбора и обработки информации, не создающие ценность (общее время — 6,5 ч). Желтым выделены операции принятия решения технологом и непосредственные действия ремонтной бригады, приносящие ценность (общее время — 3,5 ч). Общее время устранения аварийной ситуации составляет 10 ч. За это время потери нефти могут составить в среднем до 2 т нефти на скважину (по средней продуктивности скважин ОАО "Удмуртнефть").

При нештатных ситуациях/аварийных остановках скважины решение о необходимости обслуживания принимается с запозданием. Документооборот осуществляется на бумажных носителях, что также усложняет передачу информации и снижает скорость передачи и принятия решения. Технолог не всегда имеет достаточно компетенций и данных для принятия наиболее оптимального решения. Возможность предотвратить аварийную остановку скважины практически отсутствует. Также есть и другие общие проблемы:

1. Невозможность своевременного реагирования на меняющиеся условия и нештатные ситуации.

2. Увеличение операционных затрат при эксплуатации фонда скважин (техника, человеческий ресурс, обслуживание и т.д.).

3. Невозможность в режиме реального времени анализировать геологический и технологический потенциалы фонда скважин.

4. Отсутствие контроля системы "Пласт—скважина—насос" приводит к снижению эффективности эксплуатации месторождения и неоперативной оптимизации работы.

Прикладная интерпретация и иллюстрация полученных результатов исследования

Предлагаемая модель процесса. В предлагаемом решении "Скважина как клиент" центром принятия решения становится программное обеспечение с элементами искусственного интеллекта. За персоналом остается контроль корректности принимаемых решений, настройка и обучение [6].

В рамках проекта цифровизации скважин можно реализовать три опции, которые позволят снизить до минимума время реагирования на аварийную ситуацию и, в конечном итоге, полностью предупреждать все возможные аварии:

1. Устранение неэффективного времени на сбор, обработку и передачу информации за счет автоматизации сбора и передачи информации, т. е. снижение до нуля затрат времени, не создающего ценность.

2. Ускорение принятия решения технологом по дальнейшим действиям (анализ информации и выдача рекомендаций технологю по необходимым мероприятиям). Сокращение времени с 0,5 ч до нескольких секунд для принятия решения.

3. Своевременное реагирование для предотвращения аварийной остановки скважины (предиктивный анализ текущих параметров процесса и предотвращение остановки скважины, профилактический выезд бригады, отсутствие аварий). Отслеживание параметров работы скважины в постоянном режиме для предотвращения возможных аварий, т. е. полное предотвращение аварийных ситуаций. Снижение до нуля часов времени работы бригады в неплановом (аварийном) режиме.

Таким образом, идеальная реализация проекта по цифровизации позволит исключить аварийные остановки скважин (затраты на аварийные остановки должны быть равны нулю), обеспечить оптимальное планирование профилактических ремонтных работ, принимать своевременные и оптимальные технологические решения по обслуживанию и поддержанию работы скважин в период эксплуатации месторождений.

В нашем проекте рассмотрена оптимизация процесса обслуживания скважин по трем опциям:

1. "Скважина как клиент". Устранение неэффективного времени на сбор, обработку и передачу информации (рис. 3, см. вторую сторону обложки). Оптимизация составит 6,5 ч.

2. "Цифровой технолог". Ускорение принятия решения по дальнейшим действиям технологом, сокращение времени на 0,5 ч (рис. 4, см. третью сторону обложки).

3. "Предиктивная аналитика". Автоматизированное изменение режима работы скважины (рис. 5, см. третью сторону обложки). Оптимизация составит 3 ч.

Автоматизированное поступление данных в систему исключает необходимость выезда оператора на скважину, передачу информации между оператором и диспетчером и далее технологом. По типовым проблемам допустимо принятие решений с использованием систем управления на основе искусственного интеллекта, что существенно сократит время реагирования инженерного персонала, повысит качество принимаемых решений за счет исключения человеческого фактора.

Предусмотрены три режима функционирования такой системы управления на основе искусственного интеллекта:

1. При оптимальном режиме работы скважины либо при изменении режима работы скважины в допустимых пределах осуществление контроля параметров и в режиме on-line изменение режима согласно заданным регламентам работы скважины.

2. При фиксации параметров режима работы скважины, не заданных регламентом ее работы, система управления направляет решение на согласование технологю. В данном режиме оптимизация процесса составит 9 ч.

3. При изменении режима работы скважины до критических значений параметров система управления автоматически направляет технологю разработанный план профилактических мероприятий на согласование и корректировку. Технолог подтверждает необходимость проведения профилактических/ремонтных мероприятий, после чего организуется выезд ремонтного звена с остановкой скважины после прибытия персонала на место проведения работы.

Для организации работы профилактических ремонтных бригад также необходимо использование описываемой системы на основе искусственного интеллекта. Многокритериальная оценка с элементами нечеткой логики для определения приоритета обслуживания скважин тоже должна выполняться автоматически с учетом назначения скважины, про-

дуктивности работы скважины, удаленности, труднодоступности, риска аварийной остановки и других факторов [7].

На рис. 6 (см. третью сторону обложки) для сравнения экономической эффективности предлагаемого проектного решения выполнен расчет дополнительной численности требуемого персонала для достижения заданных показателей проекта при снижении времени реагирования.

Снижение одной минуты простоя в рамках проекта по цифровизации принесет дополнительно 8 млн руб чистого денежного потока, а снижение одной минуты простоя за счет привлечения дополнительных работников уменьшает чистый денежный поток предприятия на 25,2 млн руб. (оценка выполнена на базе основного расчета экономической эффективности на период реализации проекта за 2019...2028 гг.). Применение предлагаемой нами системы цифровизации производственного процесса позволит на первом этапе снизить время реагирования без привлечения дополнительного персонала, а на последующих этапах снизить до нуля аварийные остановки скважин.

Для реализации проекта цифровизации скважин была рассчитана экономическая эффективность проекта. При норме дисконта в 15 % (наиболее распространенный уровень ставки дисконтирования, применяемый крупнейшими нефтедобывающими компаниями России и мировыми лидерами при оценке инвестиционных проектов) показатели экономической эффективности проекта составили:

- NPV (чистый дисконтированный доход) = 82 млн руб.;
- IRR (внутренняя норма доходности) = 19,2 %;
- DPI (дисконтированный индекс доходности) = 1,08 ед.;
- DPP (период окупаемости) = 8,8 лет.

Заключение

Таким образом, проект по цифровизации скважин для месторождений ОАО "Удмуртнефть" выглядит привлекательным не только со стратегической точки зрения, но и с учетом его экономической эффективности.

Реализация проекта позволит достичь следующих ключевых показателей эффективности в период с 2019 по 2023 гг.:

- ежегодно на 25 % сократить внеплановые аварийные внутрисменные потери нефти,

снизить внутрисменные потери нефти — на 14 тыс. т в 2019 г. и с 2023 г. — на 4,7 тыс. т ежегодно;

- обеспечить поддержание базовой, основной и дополнительной добычи и повысить эффективность закачки за счет мониторинга системы поддержания пластового давления — 44 тыс. т нефти в 2019 г. и с 2023 г. — на 11 тыс. т ежегодно;
- обеспечить поддержание базовой, основной и дополнительной добычи за счет сокращения длительности закачки в результате мониторинга эффективности закачки со 134 мин к концу 2019 г. до 35 мин к 2023 г. по каждому месторождению за счет подключения объектов к высокоскоростным каналам связи широкополосного доступа (скорость реагирования автоматики с учетом реализации программы составит не более 5 мин, текущая же скорость может достигать до 90...120 мин из-за длительного цикла опроса объектов). Это позволит дополнительно добывать до 1 тыс. т. нефти ежегодно;
- устранить/минимизировать риски в области промышленной безопасности и охраны труда, связанные с эксплуатацией опасных производственных объектов.

Список литературы

1. Вертакова Ю. В., Толстых Т. О., Шкарупета Е. В., Дмитриева В. В. Трансформация управленческих систем под воздействием цифровизации экономики: монография. Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2017. 156 с.
2. Плотников В. А., Койда С. П. Информационная инфраструктура и ее роль в обеспечении инновационного развития бизнеса // Экономика и управление. 2014. № 1 (99). С. 30—35.
3. Забродин О. Ю. Анализ текущего состояния ГНО. Разработка методологии по дальнейшей эксплуатации системы "пласт-скважина-насос" // Инженерная практика. 2015. № 9. С. 4—11.
4. Попова М. "Умная" добыча [Электронный ресурс] // РБК +, тематическое приложение к ежедневной деловой газете "Топливо-энергетический комплекс" № 81 от 07.06.2019г. URL: <https://plus.rbc.ru/news/5cf91e087a8aa909f4572ab3>.
5. Сайт группы компаний "Новомет" [Электронный ресурс] // Интеллектуальная скважина. URL: <http://www.novomet.ru/rus/products/smart/smart-well/>.
6. Лапина А. "Ростелеком" представил технологию для сопровождения месторождений на основе IoT" [Электронный ресурс] // Коммерсант. Вып. от 11.11.2018г. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3842979>.
7. Еникеев Р. М., Гарифуллин А. Р., Валиахметов Р. И. Интеллектуализация работы мехфонда: спешить или не топориться? // Инженерная практика. 2016. № 10—11.

M. A. Nechukhaev, Deputy Director of the Department of Operational Management and Monitoring, Rosneft PJSC, Moscow, Russian Federation,
V. V. Chepkasov, First Deputy General Director of Udmurtneft, Izhevsk, Russian Federation,
N. O. Vakhrusheva, Ph.D., Head of the Department for Technological Development, Izhevsk Petroleum Scientific Center CJSC, e-mail: NOVahrusheva@udmurtneft.ru, Izhevsk, Russian Federation

Improving of Business Process of Servicing Wells using Digital Technology

Russian oil and gas companies are implementing projects to digitalize their fields. Enterprises use digital twins technology to model and predict scenarios for optimizing field development and field operation processes. The objectives of the article relate well operation (the main element of the technological process of oil production) and digitalization of the process. The processes are analyzed in detail in the article, shortcomings and opportunities for their improvement are identified. Digitalization of the well will allow to implement 3 possible control options. The final result is a reduction of the response time to an emergency to a minimum and, ultimately, a complete prevention of all possible accidents (possible types of accidents are formulated). There are 3 modes of functioning of artificial intelligence. The concept of all possible modes has been developed. The economic feasibility of implementing a project on the introduction of digital technologies in the process of well maintenance is revealed on the example of the fields of JSC Udmurtneft. The estimated economic effect is calculated. The calculation of the additional number of required personnel to achieve the specified project indicators with a decrease in response time is performed. The project looks attractive from a strategic point of view, taking into account its economic efficiency. Unscheduled oil loss emergencies are reduced annually, in-shift oil losses are reduced, basic, main and additional production is maintained by monitoring the pumping efficiency, and risks in the field of industrial safety, labor protection and the environment are eliminated / minimized.

Keywords: field digitalization; digital well; automation; well service; digitalization efficiency; Udmurtneft

DOI: 10.17587/it.26.548-552

References

1. **Vertakova Yu. V., Tolstykh T. O., Shkarupeta E. V., Dmitrieva V. V.** Transformation of management systems under the influence of digitalization of the economy, Kursk, Publishing House of the Southwestern State University, 2017. 156p. (in Russian).
2. **Plotnikov V. A., Koida S. P.** Information infrastructure and its role in ensuring innovative business development, *Economics and Management*, 2014, no. 1 (99), pp. 30–35 (in Russian).
3. **Zabrodin, O. Yu.** Analysis of the current state of GNO. Development of a methodology for the further operation of the "reservoir-well-pump" system, *Engineering Practice*, 2015, no. 9, pp. 4–11 (in Russian).
4. **Popova M.** "Smart" production, *RBC +, thematic supplement to the daily business newspaper "Fuel and Energy Complex"*, no. 81, dated June 7, 2019, available at: <https://plus.rbc.ru/news/5cf91e087a8aa909f4572ab3> (in Russian).
5. **The site** of the Novomet group of companies, Intelligent well, available at: <http://www.novomet.ru/rus/products/smart/smart-well/> (in Russian).
6. **Lapina A.** Rostelecom introduced the technology for tracking fields based on IoT, *Kommersant Electronic Journal*, November 11, 2018, available at: <https://www.kommersant.ru/doc/3842979> (in Russian).
7. **Enikeev R. M., Garifullin A. R., Valiakhmetov R. I.** Intellectualization of the work of the mechanical fund: to rush or not to rush?, *Engineering Practice*, 2016, no. 10–11 (in Russian).

Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: it@novtex.ru

Технический редактор *Е. В. Конова*.

Корректор *М. Ю. Безменова*.

Сдано в набор 09.07.2020. Подписано в печать 31.08.2020. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ IT920. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Оригинал-макет ООО "Авансд солишнз". Отпечатано в ООО "Авансд солишнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунки к статье М. А. Нечухаева, В. В. Чепкасова, Н. О. Вахрушевой
**«СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ БИЗНЕС-ПРОЦЕССА ОБСЛУЖИВАНИЯ СКВАЖИН
 С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»**



Рис. 4. Минимизация влияния человеческого фактора на принятие решения о дальнейших действиях по обслуживанию скважин



Рис. 5. Применение системы управления на основе искусственного интеллекта

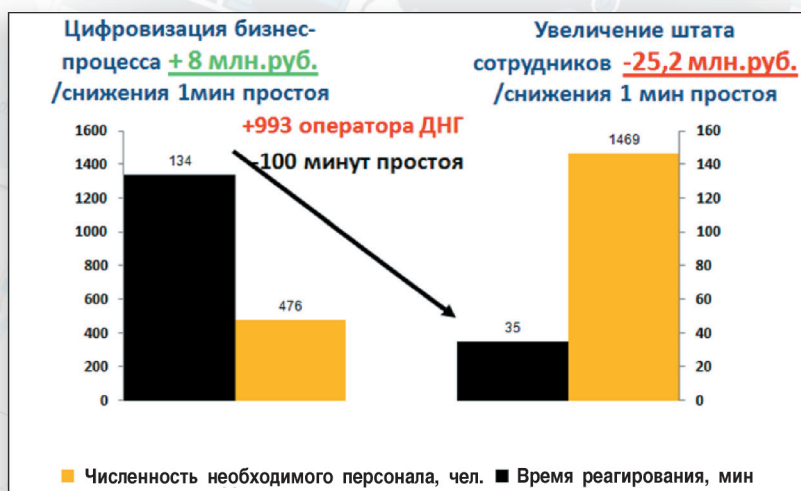


Рис. 6. Дополнительная численность, требуемая для достижения заданных показателей проекта без цифровизации

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» выпускает научно-технические журналы



Ежемесячный теоретический
и прикладной научно-технический журнал

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития основных направлений в области разработки, производства и применения информационных технологий.

Подписной индекс по Объединенному каталогу
«Пресса России» – 72656



Научно-практический
и учебно-методический журнал

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В журнале освещаются достижения и перспективы в области исследований, обеспечения и совершенствования защиты человека от всех видов опасностей производственной и природной среды, их контроля, мониторинга, предотвращения, ликвидации последствий аварий и катастроф, образования в сфере безопасности жизнедеятельности.

Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79963

Междисциплинарный
теоретический и прикладной
научно-технический журнал

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития нано- и микросистемной техники, рассматриваются вопросы разработки и внедрения нано микросистем в различные области науки, технологии и производства.



Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79493



Ежемесячный теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

В журнале освещаются достижения в области мехатроники, интегрирующей механику, электронику, автоматику и информатику в целях совершенствования технологий производства и создания техники новых поколений. Рассматриваются актуальные проблемы теории и практики автоматического и автоматизированного управления техническими объектами и технологическими процессами в промышленности, энергетике и на транспорте.

Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79492

Теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале освещаются состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваются достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.



Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 22765

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков:

107076, Москва, Стромкинский пер., 4. Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ".
Тел.: (499) 269-55-10, 269-53-97. Факс: (499) 269-55-10. E-mail: antonov@novtex.ru