

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Программная Инженерия

Том 14. № 9. 2023



Рисунки к статье А. П. Соколова, Е. А. Питухина, А. И. Шабаева,
 О. Н. Галактионова., О. А. Зятевой
 «КОНЦЕПЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ
 ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ
 ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА»



Рис. 2. Основные направления работ по созданию ИС ПУРВУ



Рис. 3. Структурно-функциональная схема ИС ПУРВУ

Программная инженерия

Пр
ИН
Том 14
№ 9
2023

Учредитель: Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

Издается с сентября 2010 г.

DOI 10.17587/issn.2220-3397

ISSN 2220-3397

Редакционный совет

Садовничий В.А., акад. РАН
(председатель)
Бетелин В.Б., акад. РАН
Васильев В.Н., чл.-корр. РАН
Макаров В.Л., акад. РАН
Панченко В.Я., акад. РАН
Стемпковский А.Л., акад. РАН
Ухлинов Л.М., д.т.н.
Федоров И.Б., акад. РАН
Четверушкин Б.Н., акад. РАН

Главный редактор

Васенин В.А., д.ф.-м.н., проф.

Редколлегия

Антонов Б.И.
Афонин С.А., к.ф.-м.н.
Бурдонов И.Б., д.ф.-м.н., проф.
Борзовс Ю., проф. (Латвия)
Гаврилов А.В., к.т.н.
Галатенко А.В., к.ф.-м.н.
Корнеев В.В., д.т.н., проф.
Костюхин К.А., к.ф.-м.н.
Махортов С.Д., д.ф.-м.н., доц.
Манцивода А.В., д.ф.-м.н., доц.
Назирова Р.Р., д.т.н., проф.
Нечаев В.В., д.т.н., проф.
Новиков Б.А., д.ф.-м.н., проф.
Павлов В.Л. (США)
Пальчунов Д.Е., д.ф.-м.н., доц.
Петренко А.К., д.ф.-м.н., проф.
Позднеев Б.М., д.т.н., проф.
Позин Б.А., д.т.н., проф.
Серебряков В.А., д.ф.-м.н., проф.
Сорокин А.В., к.т.н., доц.
Терехов А.Н., д.ф.-м.н., проф.
Филимонов Н.Б., д.т.н., проф.
Шапченко К.А., к.ф.-м.н.
Шундеев А.С., к.ф.-м.н.
Щур Л.Н., д.ф.-м.н., проф.
Язов Ю.К., д.т.н., проф.
Якобсон И., проф. (Швейцария)

Редакция

Чугунова А.В.

Журнал издается при поддержке Отделения математических наук РАН, Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова, МГТУ имени Н.Э. Баумана

СОДЕРЖАНИЕ

- Соколов А. П., Питухин Е. А., Шабаетов А. И., Галактионов О. Н., Зятева О. А.** Концепция информационной системы поддержки принятия решений по повышению эффективности функционирования лесного комплекса 419
- Валеев А. Ф.** Оценка эффективности автоматизации процессов научных исследований живучести объектов добычи газа 431
- Rego G. E.** Mathematical Modeling Method for Detecting the Fuzzy Occurrence of Dangerous Events 442
- Стебеньков А. М., Сунагатуллина А. И.** Экспертная система диагностики посттравматического стрессового расстройства 452
- Туровский Я. А., Алексеев В. Ю., Борзунов С. В.** Информационная система оценки подготовки оператора к условиям управления эргатической системой в условиях отсутствия обратной связи 460

Журнал зарегистрирован
в Федеральной службе
по надзору в сфере связи,
информационных технологий
и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-38590 от 24 декабря 2009 г.

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в подписных агентствах (индекс по Объединенному каталогу "Пресса России" — 22765) или непосредственно в редакции (для юридических лиц).
Тел.: (499) 270-16-52.

[Http://novtex.ru/prin/rus](http://novtex.ru/prin/rus) E-mail: prin@novtex.ru

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) и Russian Science Citation Index (RSCI).

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.

© Издательство "Новые технологии", "Программная инженерия", 2023

Editorial Council:

SADOVNICHY V. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Acad. RAS (*Head*)
BETELIN V. B., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Acad. RAS
VASIL'EV V. N., Dr. Sci. (Tech.), Cor.-Mem. RAS
MAKAROV V. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Acad.
RAS
PANCHENKO V. YA., Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Acad. RAS
STEMPKOVSKY A. L., Dr. Sci. (Tech.), Acad. RAS
UKHLINOV L. M., Dr. Sci. (Tech.)
FEDOROV I. B., Dr. Sci. (Tech.), Acad. RAS
CHETVERTUSHKIN B. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Acad. RAS

Editor-in-Chief:

VASENIN V. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.)

Editorial Board:

ANTONOV B.I.
AFONIN S.A., Cand. Sci. (Phys.-Math)
BURDONOV I.B., Dr. Sci. (Phys.-Math)
BORZOV JURIS, Dr. Sci. (Comp. Sci), Latvia
GALATENKO A.V., Cand. Sci. (Phys.-Math)
GAVRILOV A.V., Cand. Sci. (Tech)
JACOBSON IVAR, Dr. Sci. (Philos., Comp. Sci.),
Switzerland
KORNEEV V.V., Dr. Sci. (Tech)
KOSTYUKHIN K.A., Cand. Sci. (Phys.-Math)
MAKHORTOV S.D., Dr. Sci. (Phys.-Math)
MANCIVODA A.V., Dr. Sci. (Phys.-Math)
NAZIROV R.R., Dr. Sci. (Tech)
NECHAEV V.V., Cand. Sci. (Tech)
NOVIKOV B.A., Dr. Sci. (Phys.-Math)
PAVLOV V.L., USA
PAL'CHUNOV D.E., Dr. Sci. (Phys.-Math)
PETRENKO A.K., Dr. Sci. (Phys.-Math)
POZDNEEV B.M., Dr. Sci. (Tech)
POZIN B.A., Dr. Sci. (Tech)
SEREBR'YAKOV V.A., Dr. Sci. (Phys.-Math)
SOROKIN A.V., Cand. Sci. (Tech)
TEREKHOV A.N., Dr. Sci. (Phys.-Math)
FILIMONOV N.B., Dr. Sci. (Tech)
SHAPCHENKO K.A., Cand. Sci. (Phys.-Math)
SHUNDEEV A.S., Cand. Sci. (Phys.-Math)
SHCHUR L.N., Dr. Sci. (Phys.-Math)
YAZOV Yu. K., Dr. Sci. (Tech)

Editors:

CHUGUNOVA A.V.

CONTENTS

**Sokolov A. P., Pitukhin E. A., Shabaev A. I., Galaktionov O. N.,
Zyateva O. A.** The Concept of an Information System to Support
Decision-Making to Improve the Efficiency of the Forest Complex 419

Valeev A. F. Evaluation of the Automated System of Scientific
Research on the Survivability of Gas Production Facilities
Effectiveness 431

Rego G. E. Mathematical Modeling Method for Detecting the Fuzzy
Occurrence of Dangerous Events 442

Stebenkov A. M., Sunagatullina A. I. Expert System for Diagnosing
Post-Traumatic Stress Disorder 452

Turovsky Ya. A., Alekseev V. Yu., Borzunov S. V. Information
System for Evaluation of Operator's Preparation for Control
Conditions of Ergacy System without Feedback 460

А. П. Соколов, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, a_sokolov@petsru.ru,
Е. А. Питухин, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры, eugene@petsru.ru,
А. И. Шабаетв, канд. техн. наук, доц. кафедры, ashabaev@petsru.ru,
О. Н. Галактионов, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, galakt@petsru.ru,
О. А. Зятева, канд. техн. наук, доц. кафедры, olga_zyateva@mail.ru,
Петрозаводский государственный университет

Концепция информационной системы поддержки принятия решений по повышению эффективности функционирования лесного комплекса*

*Поступила в редакцию 06.07.2023
Принята к публикации 20.07.2023*

Статья посвящена обсуждению возможностей повышения эффективности функционирования лесной отрасли северных и арктических приграничных районов РФ в новых геополитических и экономических условиях с помощью применения нового типа региональной информационной системы сценарного моделирования и поддержки принятия стратегических управленческих решений верхнего уровня. Необходимость разработки подобной системы обусловлена изменениями, происходящими в экономике России в течение последних лет, в том числе определяемыми курсом на широкое импортозамещение, развитие глубокой переработки природных ресурсов внутри страны, сокращением экспорта товаров с низкой степенью переработки, санкционной политикой ряда западных стран и т. д. Эти изменения требуют выработки научно-обоснованных эффективных решений по использованию древесины в промышленных и потребительских целях. Данная проблема особенно актуальна для приграничных районов, в течение длительного времени во многом ориентировавшихся именно на экспорт многих видов продукции.

Описаны концепция информационной системы, ее функции и структурно-функциональная схема модели предметной области. Сформулированы требования к системе и предложена ее архитектура верхнего уровня. Разработана структурная модель интеграции этой информационной системы в схему управления системой «лесной комплекс — окружающая среда — экономика региона». Подчеркивается, что применение системы позволит выбирать наиболее эффективные варианты развития лесного комплекса с учетом всех требований, касающихся обеспечения рационального и неистощимого лесопользования и устойчивого развития с учетом особенностей приграничных регионов Севера и Арктики.

Ключевые слова: лесной комплекс, рациональное лесопользование, информационная система, прогнозное моделирование, оптимальные сценарии, архитектура верхнего уровня, управленческие решения

Для цитирования:

Соколов А. П., Питухин Е. А., Шабаетв А. И., Галактионов О. Н., Зятева О. А. Концепция информационной системы поддержки принятия решений по повышению эффективности функционирования лесного комплекса // Программная инженерия. 2023. Том 14, № 9. С. 419—430. DOI: 10.17587/prin.14.419-430.

Введение

Принципы рационального лесопользования, как попытка решения конфликта между эколо-

гическими и экономическими интересами, были впервые официально выдвинуты в 1987 г. в докладе Всемирной комиссии по вопросам окружающей среды и развития на Генеральной ассамблее ООН [1]. В 1992 г. на конференции в Рио-де-Жанейро было принято решение о необходимости разработки единых подходов и терминов, опре-

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 075-03-2023-128).

деляющих понятие рационального или неистощимого лесопользования. В 1995 г. была принята Сантьягская декларация, содержащая набор критериев и индикаторов, применяемых для оценки состояния лесных таежных экосистем, сохранения и устойчивого управления ими [2].

Проблема рационального или неистощимого лесопользования имеет тесную связь с концепцией устойчивого развития, которая получила широкое распространение после публикации доклада «Наше будущее» (1987 г.), подготовленного комиссией ООН по окружающей среде и развитию [1]. Российская Федерация, начиная с 1996 г., также определяет концепцию устойчивого развития в качестве одного из основополагающих государственных принципов (Указ Президента РФ от 01.04.1996 № 440 «О Концепции перехода Российской Федерации к устойчивому развитию») [3]. Это требует новых подходов в определении экономической региональной политики, а также разработки новых форм и методов управления устойчивостью социально-экономического развития региона. Устойчивое развитие регионов Севера и Арктики наряду с общими закономерностями функционирования и развития национальной экономики имеет и свои специфические особенности, определяемые удельным весом продукции базовых отраслей региона в общем объеме продукции в стране, наличием экспортного сектора в экономике региона, обеспеченностью ресурсным потенциалом, природно-климатическими условиями и т. д. [4].

Устойчивое развитие региона определяется устойчивостью функционирования структурообразующих производств, под которой понимается их способность противостоять воздействиям глобальных и локальных вызовов, потенциально приводящих к спаду производства [5, 6]. Это становится все более актуальным в последнее время, когда различные глобальные внешние и внутренние вызовы стали проявляться все чаще. В этих условиях устойчиво развивающейся может являться деятельность, которая способна в нужных объемах обеспечить производство всей необходимой номенклатуры товаров потребления с минимальными издержками при эффективном использовании всех производственных факторов. Устойчивость же воспроизводства территориально-хозяйственного комплекса региона определяется непрерывным поддержанием экономического роста при минимальных затратах, обеспечением экономической и общественной безопасности, что соответствует более полному удовлетворению духовных и материальных нужд населения региона [7].

Лесной комплекс как совокупность производств, обеспечивающих рациональное и устойчи-

вое использование лесных ресурсов, традиционно входит в состав структурообразующих отраслей регионов Европейского Севера России и прилегающих арктических территорий. В «Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» в качестве одной из целей отмечается «повышение долгосрочной конкурентоспособности лесной промышленности и увеличение вклада лесного комплекса в социально-экономическое развитие России». При этом в числе проблем, сдерживающих достижение указанной цели, отмечаются: низкая степень использования лесного сырья, ухудшающая экономику отрасли; ограниченный масштаб внутреннего рынка, недостаточный для создания новых производств в отрыве от экспортных рынков; низкая инвестиционная привлекательность отрасли, обусловленная структурными факторами; низкий уровень технического, научного и кадрового обеспечения и т. д. [8].

Изменения, происходящие в экономике России в течение последних лет, в том числе определяемые курсом на широкое импортозамещение, развитие глубокой переработки природных ресурсов внутри страны, сокращением экспорта товаров с низкой степенью переработки, санкционной политикой ряда западных стран и т. д., требуют выработки эффективных решений по использованию древесины в промышленных и потребительских целях. Это особенно актуально для приграничных районов, в течение длительного времени во многом ориентировавшихся именно на экспорт многих видов продукции. Отсутствие таких эффективных решений или их недостаточная адекватность реальной ситуации очевидно приведет к снижению объемов лесозаготовок и далее по цепочке технологических поставок к необходимости снижения объемов переработки древесины и последующему сокращению занятости населения, что может обернуться весьма негативными экономическими и социальными последствиями. Таким образом, развитие внутренних производственных мощностей, поиск новых способов использования древесины, разработка инновационных методов ее преобразования и использования являются актуальнейшей задачей текущего момента и перспективной для роста экономики регионов Севера и Арктики в будущем.

Вызовы внешней среды в настоящее время не ограничиваются только экономикой, но диктуют необходимость учета также политических, социальных, экологических, природных и технологических факторов и возмущающих воздействий.

Непредсказуемое влияние на спрос оказала пандемия COVID-19, в результате которой вначале

произошел спад производства продукции лесного комплекса, а затем скачок цен в силу возросшего спроса на нее. Последствием этого явилась финансовая нестабильность и зависимость от конъюнктуры мировых рынков, вследствие которых возросла важность одновременного учета интересов рыночных игроков, а именно — заказчиков продукции, конкурентных производств и поставщиков сырья, которые оказывают совместное влияние на спрос, предложение и ценообразование производимой продукции [9].

Непреодолимые тенденции развития информационного общества нашли свое выражение в процессах повсеместной цифровизации экономики и социальной сферы, которые затронули и производство. В программе «Цифровая экономика Российской Федерации» [10] отмечается, что одной из ее целей является «повышение конкурентоспособности на глобальном рынке, как отдельных отраслей экономики Российской Федерации, так и экономики в целом».

Таким образом, формируется обновленный перечень факторов целеполагания и внешней среды, влияющих на функционирование холдингов лесного комплекса в условиях глобальной конкуренции и цифровой трансформации общества. Игнорирование данных факторов при принятии управленческих решений будет способствовать снижению эффективности функционирования предприятий лесопромышленного комплекса.

Материалы и методы исследования

Руководители и управленческий аппарат федеральных и региональных органов исполнительной власти для принятия управленческих решений традиционно используют аналитику социально-экономического развития регионов, не принимающую во внимание указанные выше факторы. Большинство современных информационных систем управления предприятиями лесного комплекса также не в полной мере учитывают их. Это обуславливает нехватку у руководителей регионов и топ-менеджмента предприятий лесного комплекса программных средств, позволяющих принимать научно-обоснованные управленческие решения с учетом новых вызовов.

Проблема при проектировании таких средств поддержки принятия управленческих решений заключается в том, что для обеспечения эффективности работы предприятий лесного комплекса в стратегической, длительной перспективе, недостаточно уметь решать только задачи объемного и календарного планирования. Реализуемое в ин-

формационной системе сценарного моделирования и поддержки принятия управленческих решений сложное математическое обеспечение должно быть основано на новом подходе. Такой подход способствовал бы решению не только тактических задач планирования, но и стратегических задач, направленных на обеспечение взаимодействия с внешней средой, например, путем гармонизации разнонаправленных интересов в системе «лесной комплекс — окружающая среда — социально-экономические интересы региона».

Таким образом, в рамках реализации концепции импортозамещения и цифровизации экономики актуальным является разработка отечественных информационных систем поддержки принятия управленческих решений с функциями глубокой аналитики данных и сценарного управления. Разработка таких передовых программных систем в России будет гарантировать их юридическую независимость от зарубежных компаний-разработчиков программного обеспечения и внесет существенный вклад в развитие промышленности и цифровой экономики в России в контексте ужесточающихся санкций.

Реализация концепции устойчивого развития лесного комплекса как одной из ключевых отраслей Европейского Севера и Арктики в условиях интенсивного действия глобальных и локальных вызовов требует точного обоснования принимаемых решений с учетом большого числа влияющих факторов и ограничений, описанных выше. При принятии управленческих решений в целях повышения эффективности функционирования руководителям и управленческому аппарату федеральных и региональных органов исполнительной власти, руководству и топ-менеджменту предприятий лесного комплекса необходимо руководствоваться обоснованными научными рекомендациями. Такой подход становится жизненно важным в современных условиях агрессивной санкционной внешней среды, где цена за неверно принятое управленческое решение в экономике и социальной сфере может быть недопустимо высока.

В связи с изложенным выше целесообразным видится разработка комплекса математических моделей, методов и алгоритмов поддержки принятия решений, касающихся выбора направлений развития лесного комплекса и поддерживающих его систем инфраструктуры, реализуемого в составе нового типа региональной информационной системы сценарного моделирования и поддержки принятия стратегических управленческих решений верхнего уровня (ИС ПУРВУ). Данная система должна стать действенным инструментом для обе-

спечения повышения эффективности функционирования лесной отрасли северных и арктических приграничных районов в новых геополитических и экономических условиях.

Концептуальная модель информационной системы ИС ПУРВУ

Общая концепция ИС ПУРВУ схематично представлена на рис. 1. Концепция — четырех-уровневая. На первом уровне происходит сбор всей необходимой для функционирования системы информация, а также определяются основные ограничения экологического, ресурсного, технологического, экономического, инфраструктурного характера и ряд других.

Основными направлениями сбора исходных данных, включая информацию о действующих ограничениях, являются: прогнозируемый спрос на уже производимые и перспективные виды продукции; актуальный уровень цен на них; доступные в регионе сырьевые, энергетические и трудовые ресурсы; возможные объемы инвестиций и их источники; транспортная инфраструктура и издержки с учетом имеющейся транспортной сети и размещения существующих и потенциальных производителей и потребителей; применяемые и перспективные виды про-

дукции и технологические процессы их производства и т. д.

На втором уровне происходит поиск и оценка выявленных альтернативных направлений развития деревоперерабатывающей отрасли, основанных в том числе на производстве новых не освоенных до сих пор видов продукции. На этом уровне действует расчетная методика определения экономически обоснованных объемов выпуска различных альтернативных видов продукции при условии размещения производств в конкретных географических пунктах. В результате появляется возможность сравнения различных альтернативных вариантов развития, в том числе по экономическим критериям.

На третьем, тактико-стратегическом уровне происходит решение оптимизационной задачи выбора и территориального размещения наиболее перспективных производств. Благодаря возможностям быстрой перестройки и пересчета используемой модели на этом уровне предполагается выполнение анализа и сравнения различных сценариев развития лесного комплекса. На этой основе на четвертом уровне путем решения описываемых задач в динамике на базе заданного потока инвестиций должен будет генерироваться долгосрочный поэтапный план развития отрасли. Реализация представленной концепции направлена на



Рис. 1. Общая концепция информационной системы сценарного моделирования и поддержки принятия стратегических управленческих решений верхнего уровня (ИС ПУРВУ)

решение комплексной задачи, которая затрагивает шесть основных, крупных взаимосвязанных направлений (рис. 2, см. вторую сторону обложки).

На выходе по каждому из отмеченных выше направлений должен быть выработан экологически, социально и экономически сбалансированный набор технических, технологических и организационных мер, оценка и взаимное сравнение которых в различных условиях позволит осуществлять синтез эффективных решений средствами ИС ПУРВУ. Содержанием выполняемых работ должны стать:

- анализ мирового и внутреннего рынков древесного сырья и продукции из древесины;

- оценка и прогнозирование баланса неистощимого природопользования на северных и арктических территориях (на примере Республики Карелия);

- оценка объемов и характеристик ресурсов древесины, поиск и обоснование выбора перспективных направлений использования древесного сырья с учетом характеристик лесного фонда и воздействия на лесные экосистемы;

- анализ имеющихся производственных мощностей по заготовке и переработке древесины, задействованной инфраструктуры и логистики материальных потоков в лесном комплексе, применяемых технологий заготовки и переработки древесины на исследуемой территории;

- обоснование перспективных направлений совершенствования используемых технологий;

- оценка сложности технологических процессов, стоимости запуска новых технологических процессов;

- анализ существующих, но малообъемных производств;

- оценка возможностей глубокой переработки, цифровой мониторинг и разработка технологии для непрерывного контроля природных экосистем, включая выбор показателей на уровне сообщества, популяции, организма для оценки степени нарушения экосистемы;

- разработка комплексных предложений по повышению эффективности использования образующихся отходов лесопромышленного комплекса.

В качестве основных требований к перспективным технологическим направлениям можно выделить: *массовость* — возможность переработки больших объемов древесины; *универсальность процессов* — нечувствительность к качеству сырья; *отработанность* — наличие реализованных процессов и предприятий поставщиков оборудования.

Предварительный анализ показал, что наряду с расширением и увеличением объема производства традиционных видов продукции, таких как

пиломатериалы, древесные плиты, фанера, бумага и целлюлоза, для северо-западного региона РФ также могут стать весьма перспективными такие новые виды производств, как деревянное домостроение, основанное на производстве домокомплектов высокой степени заводской готовности, производство вискозы и вискозных тканей, производство мебели. Выбор тех или иных вариантов развития отрасли приведет к заметным изменениям в объемах и направлениях материальных потоков, что обусловит трансформацию существующих логистических систем. Поэтому вопросы развития инфраструктуры и логистики лесопромышленного комплекса должны рассматриваться совместно с производственными вопросами.

Структурно-функциональная схема системы сценарного моделирования

Потенциальными пользователями ИС ПУРВУ являются лица, уполномоченные принимать компетентные управленческие решения (ЛПР). К их числу относятся, во-первых, руководители высшего звена и топ-менеджмент предприятий лесного комплекса, руководители и управленческий аппарат федеральных и региональных органов исполнительной власти, а во-вторых, аналитики, ученые, эксперты, советники, специалисты, подготавливающие количественные варианты развития событий для ЛПР.

Учитывая все изложенные выше соображения, можно сформулировать перечень перечисленных далее основных задач, решаемых ИС ПУРВУ.

1. Сбор и анализ исходных данных для моделирования: получение статданных из органов официальной государственной федеральной, региональной и отраслевой статистики; проведение опросов работодателей, руководителей предприятий лесного комплекса; проведение опросов экспертного сообщества.

2. Проведение статистического и интеллектуального анализа данных методами прикладной статистики и Data Mining на предмет выявления скрытых нетривиальных взаимосвязей, в том числе описательная статистика, корреляционный, регрессионный и дискриминантный анализ, анализ ключевых факторов влияния, выявление выбросов, сегментация и классификация данных, построение причинно-следственных моделей.

3. Разработка и создание объяснительных супервизорных математических моделей верхнего уровня для компонентов системы «лесной комплекс — окружающая среда — экономика региона»: оценка влияния экзогенных внешних управляющих и возмущающих воздействий на переменные

состояния объектов моделирования и выходные показатели функционирования.

4. Проведение структурной и параметрической идентификации супервизорной математической модели верхнего уровня системы «лесной комплекс — окружающая среда — экономика региона» на примере пилотного региона, территориально входящего в Арктическую и субарктическую зону Российской Федерации с высокой долей вклада производства продукции лесного комплекса в экономику региона — Республики Карелия.

5. Проведение прогнозного моделирования развития системы «лесной комплекс — окружающая среда — экономика региона»:

а) на примере Республики Карелия на среднесрочный, долгосрочный и дальнесрочный период прогнозирования, в том числе в целях определения количественных значений показателей функционирования системы и допустимого диапазона изменений значений внешних воздействий;

б) проведение сценарного и имитационного моделирования типа «что будет, если? ...» для определения влияния сочетания комбинаций управляющих и возмущающих факторов внешних воздействий на выходные показатели системы «лесной комплекс — окружающая среда — экономика региона».

6. Нахождение оптимальных и субоптимальных решений (значений управляющих воздействий) задачи обеспечения устойчивого развития системы «лесной комплекс — окружающая среда — экономика региона»: на примере Республики Карелия на основе проведенного ранее сценарного и имитационного моделирования.

7. Создание информационной системы сценарного моделирования и поддержки принятия стратегических управленческих решений верхнего уровня в целях обеспечения эффективного хозяйствования в лесной отрасли и устойчивого развития системы «лесной комплекс — окружающая среда — экономика региона» на примере Республики Карелия.

На основе перечисленных выше задач формулируются следующие требования к функциональным возможностям информационной системы.

1. Список пользовательских требований к системе:

- возможность ввода и хранения ретроспективных исходных данных по региону, включая:
 - данные по демографическим показателям;
 - данные по системе образования и рынку труда, кадровому обеспечению;
 - данные по потребляемым ресурсам;
 - данные по показателям функционирования предприятий лесного комплекса, в том чис-

ле по параметрам поставок сырья и продукции;

- данные по цифровому мониторингу лесов;
- данные по показателям состояния (загрязнения) окружающей среды;
- данные по социально-экономическим показателям;
- возможность настройки параметров сценарного моделирования работы предприятий лесного комплекса: объемы привлекаемых ресурсов, структура и логистика лесного комплекса, стратегическое и оперативное планирование, режимы работы предприятий лесопромышленного комплекса (ЛПК);
 - возможность настройки параметров сценарного моделирования внешней среды;
 - возможность хранения нормативных документов;
 - поддержка многопользовательского режима;
 - разграничение доступа по ролям;
 - возможность настройки критериев оптимизации сценарного моделирования (целевые показатели эффективности функционирования, критерии и ограничения, в том числе сроки, прибыль, затраты, инвестиции, окупаемость).

2. Список функциональных требований:

- система должна иметь возможность разграничения доступа по ролям, с помощью авторизации в системе;
- система должна иметь возможность сценарного моделирования:
 - прогноза выпуска продукции предприятий лесного комплекса;
 - прогноза обеспеченности производства ресурсами;
 - прогноза спроса и предложения на рынке ресурсов и продукции;
 - прогноза показателей состояния окружающей среды;
 - прогноза изменения социально-экономических показателей, в том числе валовой добавленной стоимости (ВДС) по видам экономической деятельности (ВЭД);
- система должна иметь возможность строить варианты прогнозных субоптимальных сценариев работы лесного комплекса и показателей эффективности;
- система должна иметь возможность настройки критериев оптимизации прогнозных сценариев планирования;
 - система должна иметь возможность хранения информации в справочниках;
 - система должна иметь возможность хранения документации;
 - система должна иметь возможность построения отчетов.

3. Виды групп пользователей в системе:
- лица, уполномоченные принимать управленческие решения (ЛПР):
 - руководители высшего звена и топ-менеджмент предприятий лесного комплекса;
 - руководители и управленческий аппарат федеральных и региональных органов исполнительной власти
 - аналитики, ученые, эксперты, советники, специалисты, подготавливающие количественные варианты развития событий для ЛПР.

На основе перечисленных выше требований к функциональным возможностям ИС ПУРВУ формулируется модель предметной области, которая приведена на рис. 3, см. вторую сторону обложки. Модель предметной области представлена в виде структурно-функциональной схемы системы сценарного моделирования и поддержки принятия стратегических управленческих решений, которая позволит решать перечисленные выше задачи на региональном уровне. Сплошной линией обведены сгруппированные данные одинаковой направленности, штриховой линией обведены множества групп исходных данных и результатов расчета.

Предметная область состоит из следующих элементов:

- Пользователь (ЛПР, аналитик):
 - запускает ПО, реализуемое в ИС ПУРВУ, с начальными данными и установленными настройками;
 - указывает параметры управления, которые будут участвовать в текущем оптимизационном расчете и устанавливает ограничения на область их значений;
 - выбирает критерии эффективности (задает целевую функцию, областные и функциональные ограничения, критерии оптимизации);
 - задает методы решения и параметры алгоритма оптимизации.
- Разрабатываемое ПО:
 - проводит необходимые вычисления на основе комплекса экономико-математических моделей и имитационного моделирования и отображает результат.
- Результат вычислений:
 - в результате пользователь получает перечень субоптимальных сценариев в виде таблицы, где каждый сценарий представляет собой кортеж вида *сценарий* = {управляющие параметры; неуправляемые параметры моделируемой системы и внешней среды; выходные показатели функционирования системы; показатели эффективности; критерии эффективности}.

Каждый сценарий отличается уникальной комбинацией значений управляющих параметров, на основе которых рассчитываются значения выходных показателей функционирования и показателей эффективности. Выбор оптимального сценария зависит от предпочтений ЛПР при формировании критерия эффективности.

В случае одновременного выбора нескольких критериев эффективности, нередко противоречивых, как, например, снижение экологического ущерба и повышение экономической рентабельности, задача становится многокритериальной. При этом для принятия итогового решения в условиях определенности предлагается использовать метод анализа иерархий. Для итогового выбора решения в условиях неопределенности предлагается использовать подход, основанный на субъективных предпочтениях ЛПР, например, варианты критериев среднего выигрыша или пессимизма-оптимизма (Гурвица) [12].

Разработка архитектуры ИС ПУРВУ

Архитектура верхнего уровня разрабатываемой системы представлена на рис. 4. Система разделяется на серверную и клиентскую части. На серверной части происходит расчет и предоставление данных для их отображения в клиентской части. На клиентской части реализуется интерфейс пользователя.

Серверная часть состоит из трех модулей:

- «Подготовка данных»;
- «Прогнозное моделирование»;
- «Поиск оптимальных сценариев».

На клиентской части реализован модуль «GUI Карты».

Приведем описание модулей системы.

- «Подготовка данных» — получает из базы данных значения показателей за отчетные года и формирует из них массив в формате JSON для передачи в клиентскую часть для отображения всех видов данных — как ретроспективных данных, так и прогнозных вариантов сценариев развития;

- «Прогнозное моделирование» — получает от клиентской части значения управляющих параметров, получает из базы данных значения показателей за отчетные года, рассчитывает параметры математической модели и на ее основе получает количественные оценки прогнозных показателей, которые далее в виде варианта сценария развития сохраняются в базе данных.

- «Поиск оптимальных сценариев» — получает от клиентской части значения ограничений, целевую функцию, критерий оптимизации. Далее, многократно используя модуль «Прогнозное моде-



Рис. 4. Архитектура верхнего уровня ИС ПУРВУ

лирование», получает множество вариантов субоптимальных сценариев развития, среди которых находится оптимальный, и сохраняет их в базу данных.

- «GUI Карты» — предоставляет пользователю интерфейс по работе с интерактивной картой показателей работы лесной отрасли приграничных регионов Севера и Арктики России, просмотра данных за отчетные года — как ретроспективных, так и прогнозных сценариев. Также обеспечивает табличное представление ретроспективных данных и вариантов моделирования прогнозных сценариев развития. Позволяет задавать входные условия проведения расчетов прогнозных показателей и поиска оптимальных сценариев.

Клиентская и серверная части взаимодействуют посредством HTTP-запросов, используя для передачи данных формат JSON. Взаимодействие модулей с базой данных происходит с помощью SQL-запросов.

Автоматизация предприятий лесной отрасли пилотного региона

Заделом и благоприятными условиями для практической реализации системы ИС ПУРВУ в Республике Карелия является высокий уровень автоматизации предприятий ЛПК Республики Карелия отечественными программными системами управления производством. Одним из лидеров-разработчиков такого ПО является ИТ-компания

«Опти-Софт», продукция которой внедрена на более чем 70 % предприятий ЛПК Республики Карелия. Компания предлагает линейку программных систем и сервисов оптимального планирования, которая последовательно и комплексно охватит основные производственные процессы от лесозаготовки до отгрузки готовой продукции. Среди них основные системы это: Opti-Wood — для планирования процессов лесопромышленного производства; Opti-Sawmill — для планирования и управления предприятиями лесопиления и деревообработки; Opti-Plywood — для планирования и управления производством фанеры; Opti-Paper — для планирования производства бумаги и картона; Opti-Bag — для планирования и управления выпуском упаковки; Opti-Supply — для оптимизации и управления лесоснабжением; Opti-Loading — для планирования погрузки продукции в транспорт (рулоны, паллеты, пакеты пиломатериалов, фанера, комплекты домов и т. п.); Opti-Storage — для оптимизации логистики складов готовой продукции.

Данные системы внедрены (●) и успешно используются на предприятиях ЛПК в следующих муниципальных образованиях (МО) и районах Карелии, а также планируются к внедрению (○) на предприятиях холдинга Segezha Group (см. таблицу).

Специально для холдингов (на примере Segezha Group) разработана координирующая система верхнего уровня Opti-Global, которая нацелена на минимизацию неконструктивных внутренних кон-

Оснащенность некоторых предприятий ЛПК Республики Карелия ПО «Опти-Софт»

МО, предприятие	Программное обеспечение							
	Opti-Wood	Opti-Sawmill	Opti-Plywood	Opti-Paper	Opti-Bag	Opti-Supply	Opti-Loading	Opti-Storage
Суоярвский район, АО «Запкареллес»	•	—	—	—	—	—	—	—
г. Петрозаводск, ООО «Соломенский Лесозавод»	—	•	—	—	—	○	—	—
г. Костомукша, ООО «Карелиан Вуд Компани»	—	•	—	—	—	—	—	—
Кондопожский район, ООО "Карелия Палп	—	—	—	•	—	○	•	○
Медвежегорский район, Segezha Group	—	—	○	—	—	—	—	—
Сегежский район, Segezha Group	○	○	—	○	○	○	○	○

Примечание: прочерк обозначает отсутствие произведенного или запланированного внедрения данного вида ПО на соответствующих предприятиях.

фликтов между продавцами и потребителями древесины внутри холдинга и может решать следующие задачи: формирование единой политики закупки сырья; координация производственных планов между различными дивизионами; создание единой политики перевозок продукции и сырья для оптимального использования транспортных средств.

На уровне холдинга, например, ставятся задачи реализации сквозного планирования цепочки поставок и интегрированного управления логистическими потоками внутри группы, рассмотрения заводов холдинга не как отдельных бизнесов, а как производственных элементов общей цепочки создания стоимости. На первый план выходит парадигма/принцип оптимизации процессов использования и переработки древесины в рамках всей группы предприятий холдинга (рис. 5, см. третью сторону обложки).

Пример на уровне холдинга показывает необходимость не разрозненной, а единой политики построения бизнес-процессов переработки древесины на примере системы Opti-Global, которая выступает прототипом ИС ПУРВУ при масштабировании задач холдинга до задач, стоящих перед лесным комплексом Республикой Карелия на региональном уровне.

Структурная модель интеграции ИС ПУРВУ в систему управления региона

С учетом существующего уровня автоматизации предприятий ЛПК Республики Карелия, предлагается следующая архитектура взаимодействия акторов ИС ПУРВУ, которая представлена в виде структурной модели управления на рис. 6.

Субъект управления в лице экспертов региональных органов власти и ученых с учетом федеральных программ, проектов и стратегий развития формирует стратегию социально-экономического развития региона. В рамках этой стратегии обозначаются значения долгосрочных целевых показателей деятельности и эффективности функционирования лесного комплекса, которых планируется добиться к определенному сроку.

Значения целевых показателей передаются в ИС ПУРВУ, которая осуществляет прогностическое моделирование вариантов сценариев развития лесного комплекса для различных значений управляющих параметров с учетом актуальной информации от информационных систем предприятий лесного комплекса, их взаимодействия с окружающей средой и экономикой региона. В результате проведения математического и имитационного моделирования рассчитываются модельные значения показателей деятельности и эффективности функционирования для объекта управления — лесного комплекса Республики Карелия, а также расчетные значения показателей окружающей среды и экономики региона.

Далее ИС ПУРВУ проводит сравнение модельных и фактических показателей, полученных из информационных систем предприятий лесного комплекса. На основе результатов сравнения формируются различные варианты реализации сценариев управленческих решений, которые в виде проектов ИС ПУРВУ направляет в соответствующие региональные органы власти. Органы власти выбирают из множества вариан-

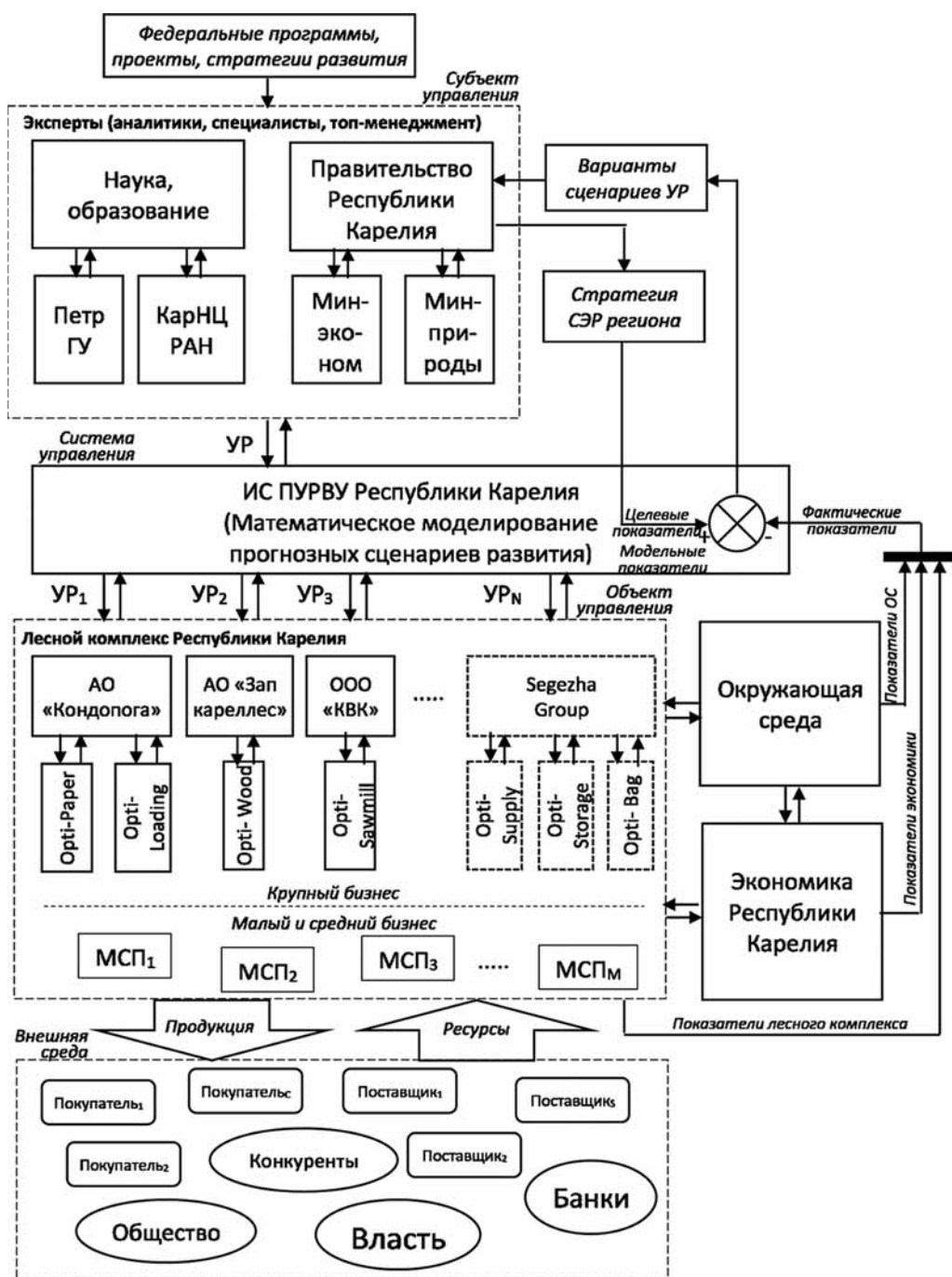


Рис. 6. Архитектура интеграции ИС ПУРВУ в схему управления системой «лесной комплекс — окружающая среда — экономика региона»:

УР — управленческие решения; СЭР — социально-экономическое развитие; ПетрГУ — Петрозаводский государственный университет; КарНЦ РАН — Карельский научный центр Российской академии наук; МСП — малое или среднее предприятие

тов наиболее приемлемый, который передается через ИС ПУРВУ обратно в системы управления предприятиями лесного комплекса в качестве рекомендаций.

Таким образом, путем итерационного исполнения циклов управления с течением времени будет уменьшаться рассогласование между модельными

и фактическими значениями показателей. Поскольку модельные показатели по управляющей траектории с течением времени стремятся к целевым, то также и реальная ситуация в системе «лесной комплекс — окружающая среда — экономика региона» будет все более приближаться к желаемой.

Заключение

Предложенные в статье методы позволят на основе актуальных данных мониторинга выполнять оценку устойчивости различных сценариев развития, отличающихся составом и производственной мощностью имеющихся и вводимых новых производств, объектов инфраструктуры, их размещением, заданными параметрами рынка, наличием и характером связей с соседними и удаленными регионами и т. д. Применение средств математического программирования и имитационного моделирования позволит выбрать наиболее эффективные варианты развития лесного комплекса с учетом всех требований, касающихся обеспечения рационального и неистощимого лесопользования и устойчивого развития с учетом особенностей приграничных регионов Севера Арктики РФ.

В результате проведенного исследования:

— предложена концептуальная модель информационной системы сценарного моделирования и поддержки принятия стратегических управленческих решений верхнего уровня;

— разработана модель предметной области и архитектура верхнего уровня информационной системы;

— разработана структурная модель интеграции этой информационной системы в схему управления системой «лесной комплекс — окружающая среда — экономика региона» с учетом реальной специфики автоматизации предприятий лесного комплекса Республики Карелия.

Список литературы

1. Доклад Международной комиссии по окружающей среде и развитию «Наше общее будущее», 1987. URL: <http://www.un.org/ru/ga/pdf/brundtland.pdf> (дата обращения 13.03.2023).
2. «Сантьягская декларация»: заявление по критериям и индикаторам для сохранения и устойчивого управления

умеренных и бореальных лесов (Монреальский процесс), 1995. URL: <http://www.silvertaiga.ru/wp-content/uploads/2017/05/mrpus.pdf> (дата обращения 13.03.2023).

3. Указ Президента РФ от 01.04.1996 № 440 «О Концепции перехода Российской Федерации к устойчивому развитию», 1996. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/9120> (дата обращения 13.03.2023).

4. Васильев В. С., Яшалова Н. Н., Новиков А. В. Климатические и экологические риски развития прибрежных арктических территорий // Арктика: экология и экономика. 2021. Том 11, № 3. С. 341—352. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-341-352.

5. Álvarez-Miranda E., Garcia-Gonzalo J., Pais C., Weintraub A. A multicriteria stochastic optimization framework for sustainable forest decision making under uncertainty // Forest Policy and Economics. 2019. Vol. 103. P. 112—122. DOI:10.1016/j.forpol.2018.03.006.

6. Constantino M., Martins I. Branch-and-cut for the forest harvest scheduling subject to clearcut and core area constraints // European Journal of Operational Research. 2018. Vol. 265, No. 2. P. 723—734. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.07.060.

7. Якушева Т. В., Григорьева С. О., Выродов А. В., Выродова С. А. Вопросы совершенствования системы регионального лесного планирования Российской Федерации с учетом основных тенденций развития лесного сектора экономики // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2017. № 1. С. 49—61. DOI: 10.21178/2079-6080.2017.1.49.

8. Потравная Е. В. Как промышленное освоение Арктики способствует народосбережению и повышению качества жизни народов Севера? // Уровень жизни населения регионов России. 2022. Том 18, № 4. С. 555—563. DOI: 10.19181/lspr.2022.18.4.11.

9. Stordal S., Gudbrand L., Trømborg E. Impacts of Infectious Disease Outbreaks on Firm Performance and Risk: The Forest Industries during the COVID-19 Pandemic // Journal of Risk and Financial Management. 2021. No. 14. Article 318. DOI: 10.3390/jrfm14070318.

10. Паспорт национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержден президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам 04.06.2019 № 7, 2019. URL: <http://static.government.ru/media/files/urKHm0gTPPnzJlaKw3M5cNLo6gczMkPF.pdf> (дата обращения 13.03.2023).

11. Шварц Е. А., Шматков Н. М., Карпачевский М. Л., Байбар А. С. Вызовы и проблемы реформирования лесного хозяйства России // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. № 241. С. 157—172. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.157-172.

12. Анфилатов В. С., Емельянов А. А., Кукушкин А. А. Системный анализ в управлении: учеб. пособие / под ред. А. А. Емельянова. М.: Финансы и статистика, 2002. 68 с.

13. Shabaev A. I., Sokolov A. P., Urban A. R., Pyatin D. S. Optimal Planning of Wood Harvesting and Timber Supply in Russian Conditions // Forests. 2020. Vol. 11, No. 6. Article 662. DOI: 10.3390/f11060662.

The Concept of an Information System to Support Decision-Making to Improve the Efficiency of the Forest Complex

A. P. Sokolov, Professor, Head of Chair, a_sokolov@petsru.ru,

E. A. Pitukhin, Professor, eugene@petsru.ru,

A. I. Shabaev, Associate Professor, ashabaev@petsru.ru,

O. N. Galaktionov, Professor, Head of Chair, galakt@petsru.ru,

O. A. Zyateva, Associate Professor, olga_zyateva@mail.ru,

Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Karelia, 185910, Russian Federation

Corresponding author:

Evgeniy A. Pitukhin, Professor,

Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Karelia, 185910, Russian Federation

E-mail: eugene@petsru.ru

The article is devoted to the discussion of the possibilities of improving the efficiency of the forest industry of the northern and arctic border regions of the Russian Federation in the new geopolitical and economic conditions. This goal is planned to be achieved through the use of a new type of regional information system of scenario modeling and support of strategic management decisions of the upper level. The need to develop such a system is due to the changes taking place in the Russian economy in recent years. They include the course on wide import substitution, development of deep processing of natural resources inside the country, reduction of export of goods with low degree of processing, sanctions policy of some Western countries, etc. These changes require the development of science-based effective solutions for the use of wood for industrial and consumer purposes. This problem is especially relevant for the border areas, for a long time largely focused on the export of many types of products.

Describes the concept of the regional information system of scenario modeling and support for strategic management decisions of the upper level, its functions and structural and functional model scheme of the subject area. The requirements for the system are formulated and its top-level architecture is proposed. The structural model of integration of this information system into the management scheme of the system “forest complex — environment — regional economy” was developed.

It is emphasized that the use of the system will allow one to choose the most effective options for the development of the forest complex, taking into account all the requirements for the provision of rational and sustainable forest management and sustainable development, taking into account the characteristics of the border regions of the North and the Arctic.

Keywords: forest complex, sustainable forest management, information system, forecast modeling, optimal scenarios, top-level architecture, management decisions.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Federation Ministry of Science and Higher Education (state research target, theme no. 075-03-2023-128).

For citation:

Sokolov A. P., Pitukhin E. A., Shabaev A. I., Galaktionov O. N., Zyateva O. A. The Concept of an Information System to Support Decision-Making to Improve the Efficiency of the Forest Complex, *Programmnyaya Ingeneria*, 2023, vol. 14, no. 9, pp. 419–430. DOI: 10.17587/prin.14.419-430.

References

1. **Report** of the World Commission on Environment and Development “Our Common Future”, 1987, available at: <http://www.un.org/ru/ga/pdf/brundtland.pdf> (date of access 13.03.2023) (in Russian).
2. “**Santiago declaration**” — statement on criteria and indicators for the conservation and sustainable management of temperate and boreal forests (“Montreal Process”), 1995, available at: <http://www.silvertaiga.ru/wp-content/uploads/2017/05/mprus.pdf> (date of access 13.03.2023) (in Russian).
3. **Decree** of the President of the Russian Federation No. 440 of April 1, 1996 “On the Concept of Transition of the Russian Federation to Sustainable Development”, 1996, available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/9120> (date of access 13.03.2023) (in Russian).
4. **Vasil'tsov V. S., Yashalova N. N., Novikov A. V.** Climatic and ecological risks of development of coastal Arctic territories, *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 341–352. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-341-352. (in Russian).
5. **Álvarez-Miranda E., Garcia-Gonzalo J., Pais C., Weintraub A.** A multicriteria stochastic optimization framework for sustainable forest decision making under uncertainty, *Forest Policy and Economics*, 2019, vol. 103, pp. 112–122. DOI: 10.1016/j.forpol.2018.03.006.
6. **Constantino M., Martins I.** Branch-and-cut for the forest harvest scheduling subject to clearcut and core area constraints, *European Journal of Operational Research*, 2018, vol. 265, no. 2, pp. 723–734. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.07.060.
7. **Yakusheva T. V., Grigorieva S. O., Vyrodov A. V., Vyrodova S. A.** Issues of improving the regional forest planning system of the Russian Federation, taking into account the main trends in the development of the forest sector of the economy, *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hoz'yajstva*, 2017, vol. 1, pp. 49–61. DOI: 10.21178/2079-6080.2017.1.49 (in Russian).
8. **Potravnaya E. V.** How does the industrial development of the Arctic contribute to saving people and improving the quality of life of the peoples of the North? *Uroven' zhizni naseleniya regionov Rossii*, 2022, vol. 18, no. 4, pp. 555–563. DOI: 10.19181/isprr.2022.18.4.11 (in Russian).
9. **Stordal S., Gudbrand L., Trømborg E.** Impacts of Infectious Disease Outbreaks on Firm Performance and Risk: The Forest Industries during the COVID-19 Pandemic, *Journal of Risk and Financial Management*, 2021, no. 14 (7), pp. 1–13. DOI: 10.3390/jrfm14070318.
10. **Passport** of the national program «Digital Economy of the Russian Federation», approved by the Presidium of the Council under the President of the Russian Federation for Strategic Development and National Projects 04.06.2019, no. 7, 2019, available at: <http://static.government.ru/media/files/urKHm0gTPPnzJlaK-w3M5cNLo6gezMkPF.pdf> (in Russian).
11. **Shvarts E. A., Shmatkov N. M., Karpachevsky M. L., Baibar A. S.** Challenges and problems of forestry reform in Russia, *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2022, no. 241, pp. 157–172. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.157-172 (in Russian).
12. **Shabaev A. I., Sokolov A. P., Urban A. R., Pyatin D. S.** Optimal Planning of Wood Harvesting and Timber Supply in Russian Conditions, *Forests*, 2020, vol. 11, no. 6, article 662. DOI: 10.3390/f11060662.

А. Ф. Валеев, канд. техн. наук, начальник отдела, vafw@yandex.ru,
ООО «Газпром добыча Оренбург», г. Оренбург

Оценка эффективности автоматизации процессов научных исследований живучести объектов добычи газа

Поступила в редакцию 15.06.2023

Принята к публикации 17.07.2023

Рассмотрены существующие подходы к оценке эффективности автоматизированных систем научных исследований. Обоснован выбор метода и разработан критерий оценки эффективности процессов научных исследований живучести объектов добычи газа с учетом таких обобщенных показателей, как время проведения исследований, ресурсоотдача, результативность. На основе экспертных оценок определены значения коэффициентов значимости показателей эффективности на этом направлении. Проведена оценка эффективности процессов научных исследований живучести объектов добычи газа с использованием существующих систем автоматизации и предложенной автоматизированной системы. Анализ результатов такой оценки показал увеличение эффективности процессов научных исследований живучести по интегральному критерию с использованием новой автоматизированной системы более чем в 2 раза, что свидетельствует об эффективности разработанного методического, информационного и программного обеспечения такой системы.

Ключевые слова: *эффективность, автоматизированная система, научные исследования, объект добычи газа, живучесть, оценка, показатель, критерий*

Для цитирования:

Валеев А. Ф. Оценка эффективности автоматизации процессов научных исследований живучести объектов добычи газа // Программная инженерия. 2023. Том 14, № 9. С. 431—441. DOI: 10.17587/prin.14.431-441.

Введение

Разработка газоконденсатных месторождений на этапе падающей добычи характеризуется появлением различных неблагоприятных воздействий, не регламентированных проектными условиями нормальной эксплуатации. Одним из основных неблагоприятных воздействий является обводнение скважин, которое со временем приводит к резкому снижению эксплуатационных показателей. При этом объема остаточных запасов газа, как правило, достаточно для поддержания промышленного уровня добычи. Для исследования системы добычи продукции при обводнении скважин предложено использовать свойство живучести, заключающееся в способности скважины поддерживать в допустимых пределах проектные значения эксплуатационных показателей в условиях, не предусмотренных регламентом нормальной эксплуатации. Ранее была

разработана автоматизированная система научных исследований (АСНИ) живучести объектов добычи газа [1]. Основу АСНИ составляет система прогностического моделирования цепочки объектов «пласт — скважина» с использованием средств обеспечения живучести — различных технологий борьбы с обводнением, которые позволяют повысить живучесть объектов добычи газа в условиях неблагоприятных воздействий на эти объекты. Оценка эффективности процессов научных исследований (НИ) живучести объектов добычи газа (ЖОДГ) с использованием АСНИ становится актуальной научной задачей, включающей: системный анализ существующих подходов к оценке эффективности АСНИ, выбор метода оценки эффективности, определение показателей, критериев эффективности и оценки эффективности процессов научных исследований живучести объектов добычи газа в условиях обводнения.

1. Анализ существующих подходов к оценке эффективности АСНИ

Вопросам оценки эффективности информационных технологий, систем автоматизации технологических процессов и АСНИ посвящены работы многих исследователей в России и за рубежом. Оценка эффективности проектных решений в нефтегазовой отрасли может проводиться по финансовой рентабельности [2]. Для определения научно-технической результативности научно-исследовательских работ используется балльная оценка [3]. Повышение эффективности процессов НИ возможно за счет создания современной базы автоматизации и планирования НИ (создания АСНИ) и подготовки инженерных и научных кадров [4]. Оценка эффективности информационных систем может проводиться на основе функционально-стоимостного анализа [5]. В статье [6] рассмотрены и проанализированы различные виды эффектов от внедрения инноваций в информационную инфраструктуру экономического объекта. В работе [7] эффективность системы оценивается как отношение суммарной целевой отдачи на интервале эксплуатации к полным затратам на всех этапах «жизни» системы. Эффективность НИ оценивается на основе различных наукометрических показателей в статье [8]. Оценке экономической эффективности информационных систем посвящены работы [9–14]. Авторы работы [15] для оценки эффективности интеллектуальных систем применяют некоторое количество измеряемых системных показателей, характеризующих производительность системы. Построение системы показателей оценки эффективности системы менеджмента качества производственных предприятий ведется на основе нечетких множеств в работе [16].

Согласно работе [17] эффективность автоматизированной системы определяется сопоставлением результатов от функционирования системы и затрат всех видов ресурсов, необходимых для ее создания и развития. Для принятия решения о степени достижения требуемой цели определяется критерий эффективности — правило, позволяющее сопоставлять стратегии, характеризующиеся различной степенью достижения цели, и осуществлять их выбор из множества допустимых [18]. Критерий эффективности автоматизированной системы определяют на множестве частных показателей, каждый из которых описывает одну из сторон рассматриваемой системы. При этом критерий может быть выражен в виде целевой функции или порядковой меры, устанавливающей упорядоченную последовательность сочетаний по-

казателей [17]. Под показателем понимается характеристика, описываемая количественно и позволяющая оценить свойство системы с какой-либо одной стороны [19].

Известны основные методы оценки эффективности систем [19]: метод среднего взвешенного; метод Парето; метод последовательных уступок; метод анализа иерархий; метод анализа среды функционирования.

Анализ источников [20–24], а также опыт проектирования различных автоматизированных информационных систем показывает, что в основном используются методы среднего взвешенного и анализа иерархий, для которых характерны простота и возможность работы с большим количеством показателей. Метод анализа иерархий ориентирован на нечеткие оценки, которые в отличие от точных количественных оценок более просты в использовании для экспертов.

Одной из основных задач при оценке эффективности является выбор и обоснование обобщенных и частных показателей эффективности, характеризующих исследуемую систему.

Выбор показателей эффективности осуществляют с учетом следующих положений [20, 25]:

- показатели должны соответствовать назначению системы;
- измеримость показателей с помощью физических величин (желательно поддающихся количественной оценке);
- выбор достаточного числа показателей (если их мало, могут не в полной мере учитываться целевые функции системы, трудоемкость оценки возрастает с ростом числа показателей);
- желательно, чтобы при выборе показателей эффективности учитывались требования действующих нормативных документов предметной области информационной системы.

Конкретный перечень показателей эффективности автоматизированной информационной системы зависит от типа решаемых задач. Обычно выделяют следующие показатели эффективности: интегральный, обобщенные и частные. Интегральный показатель характеризует эффективность всей системы в целом. Обобщенные показатели отражают различные стороны функционирования системы: техническую, экономическую, организационную, социальную и др. Частные показатели эффективности определяют конкретные характеристики системы по каждой из групп обобщенных показателей [20].

Для вычисления интегрального и обобщенных показателей эффективности систем используются методы решения многокритериальных задач.

Частные показатели эффективности принято определять [19–21, 26]:

- по аналитическим зависимостям;
- путем нормирования показателей относительно их минимальных и максимальных значений;
- как отношение расчетного значения показателя к требуемому, либо максимально (минимально) возможному;
- экспертным путем с использованием выбранной шкалы и дальнейшему приведению к значениям от 0 до 1 (нормированию).

При выборе перечня показателей эффективности на стадии эксплуатации автоматизированной информационной системы выбирают показатели, характеризующие функциональные возможности системы, ее уровень технической оснащенности, условия ее эксплуатации, наличие вспомогательных подсистем, удобство использования персоналом, его профессионализм [20].

Учитывая методы [27], определены следующие особенности НИ объектов добычи газа (ОДГ):

- проведение экспериментальных и теоретических исследований, анализ их результатов и принятие решений об эксплуатации ОДГ;
- высокая материальная и социальная степень ответственности за полученные результаты и предлагаемые рекомендации;
- длительность и высокая стоимость проведения НИ;
- необходимость представления результатов НИ в виде, требуемом для подготовки проектно-сметной документации на изменение компоновки оборудования ОДГ;
- системный характер работы групп исследователей, теоретиков и проектных организаций, необходимость сопоставления и объединения в единой информационно-модельной системе различных результатов, относящихся к ОДГ.

Оценивать эффективность рассматриваемой АСНИ предлагается с точки зрения представления возможностей более эффективно организовывать процесс НИ [27]. Таким образом, оценивается эффективность не системы автоматизации, а эффективность процессов НИ, проводимых с помощью информационных автоматизированных систем, в частности, с АСНИ ЖОДГ.

В качестве обобщенных показателей эффективности процессов НИ ОДГ предлагаются:

- время проведения исследований, включая все этапы постановки задачи, обработки информации, разработки моделей, расчетов, анализа результатов и принятия решений;
- ресурсоотдача НИ;
- результативность НИ.

С учетом предлагаемых подходов [18, 21, 22, 27] и рекомендаций [17, 28] определены следующие требования к процессам НИ ОДГ:

- сокращение времени проведения исследований, которое достигается благодаря уменьшению времени проведения вычислительных экспериментов за счет планирования, повышению оперативности обработки экспериментальных данных, повышению доступности структурированной информации;
- повышение ресурсоотдачи процесса НИ за счет увеличения производительности труда и рентабельности процесса НИ;
- повышение результативности процесса НИ за счет использования системы моделирования ОДГ, предварительного выбора возможных технологий борьбы с обводнением для анализа с учетом конструктивных и технологических особенностей ОДГ, интегрированного подхода к организации НИ, применения системы поддержки принятия управленческих решений по увеличению живучести ОДГ.

2. Обоснование выбора метода оценки эффективности процессов научных исследований живучести объектов добычи газа

Задача оценки эффективности процессов НИ ОДГ имеет следующие особенности [27]:

- используются как количественные, так и качественные показатели оценки эффективности;
- оценка некоторых показателей может быть получена только от экспертов;
- при определении ряда показателей исследователь сталкивается с неопределенностью и нечеткостью ситуации.

В настоящее время для решения задачи оценки эффективности развит ряд направлений [18, 22, 23, 27]: качественные методы принятия решений; методы многомерного шкалирования качественных переменных; методы и средства экспертных систем, методы обработки и анализа экспертной информации, методы теории нечетких множеств.

Проанализировав существующие методы, а также особенности решаемой задачи, предлагается остановиться на методах обработки и анализа экспертной информации и методах теории нечетких множеств.

Отнесение задачи оценки эффективности процессов НИ ОДГ к нечетким означает, что при ее формулировке и решении требуется обращение к знаниям экспертов [27]. В целом инструмента-

рий теории нечетких множеств позволяет учесть неопределенность и нечеткость ситуации, предлагается принять его в качестве основного для разработки показателей оценки эффективности процессов НИ ОДГ.

3. Критерий оценки эффективности процессов научных исследований живучести объектов добычи газа

В качестве частных показателей эффективности процессов НИ ОДГ определены перечисленные далее.

1. Для времени проведения исследований это
 - доступность разнородной информации;
 - оперативность обработки данных;
 - время проведения вычислительного эксперимента.
2. Для ресурсоотдачи НИ это
 - производительность труда;
 - рентабельность.
3. Для результативности НИ это
 - модельная полнота;
 - предварительный выбор технологий борьбы с обводнением для анализа;
 - используемый подход к организации НИ;
 - использование системы поддержки принятия решений.

В качестве критерия эффективности определен интегральный показатель эффективности — коэффициент эффективности процессов НИ ЖОДГ (K_{esc}), отражающий отдельные характеристики НИ: время проведения, ресурсоотдачу, результативность НИ. Для выбора наиболее эффективной АСНИ ЖОДГ предлагается критерий, математическое выражение которого представляется целевой функцией:

$$K_{esc}(k_t, k_{rc}, k_{ef}) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где k_t — показатель, характеризующий время проведения НИ; k_{rc} — показатель, характеризующий ресурсоотдачу НИ; k_{ef} — показатель, характеризующий результативность НИ.

В качестве метода устранения многопараметричности задачи оценки эффективности предлагается использовать метод аддитивной свертки показателей [22]:

$$K_{esc} = \lambda_1 k_t + \lambda_2 k_{rc} + \lambda_3 k_{ef}, \quad (2)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ — весовые коэффициенты показателей оценки эффективности НИ.

Недостатком данного подхода является тот факт, что высокие оценки по одним показате-

лям могут компенсировать низкие оценки по другим.

Экспертная оценка значений весов λ_j для показателей эффективности определялась по методу оценки важности параметров в баллах [27]. При этом каждый i -й эксперт назначает каждому j -му параметру λ_j оценку по шкале от 0 до 10, $j = \overline{1, N}$, где N — число показателей. Далее находится сумма оценок для каждого эксперта $a_i, i = \overline{1, M}$, где M — число экспертов:

$$a_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} \quad (3)$$

и определяется значение коэффициента веса:

$$\lambda_{ij} = a_{ij}/a_i. \quad (4)$$

В качестве значений веса j -го параметра λ_j принимается среднее значение по результатам оценки экспертов:

$$\lambda_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M \lambda_{ij}. \quad (5)$$

Для нахождения коэффициента эффективности K_{esc} значения весовых коэффициентов определены по методу оценки важности параметров в баллах (3)—(5) по результатам экспертного оценивания пяти экспертов: $\lambda_1 = 0,3$; $\lambda_2 = 0,3$; $\lambda_3 = 0,4$.

Такое распределение весов отражает тот факт, что ведущей, самой значимой характеристикой НИ ОДГ является их результативность, что определяется степенью важности решений, принимаемых на основе НИ.

Далее определяются оценки показателей эффективности НИ ОДГ.

Показатель, характеризующий время проведения НИ

$$k_t = \alpha_1 k_{de} + \alpha_2 k_o + \alpha_3 k_a, \quad (6)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — весовые коэффициенты показателей; k_{de} — показатель, характеризующий временной эффект от применения методов планирования эксперимента; k_o — показатель, характеризующий оперативность обработки информации; k_a — показатель, характеризующий доступность информации.

Показатель k_{de} является нечетким и может рассчитываться следующим образом. Определим показатель снижения числа опытов F при использовании методов планирования эксперимента и при технологии постановки эксперимента перебором:

$$F = N_0/N_{de}, \quad (7)$$

где N_{de} — число опытов вычислительного эксперимента при использовании методов планирования

эксперимента за счет предварительного отбора технически реализуемых средств обеспечения живучести и их компоновок в зависимости от особенностей конкретного объекта добычи газа; N_0 — число опытов при использовании технологии постановки эксперимента перебором.

Пусть значение показателя F , равное 10 и более (т. е. снижение числа опытов на порядок и более), считается значительной степенью снижения числа опытов [27].

Тогда нечеткое множество \tilde{A}_1 , характеризующее понятие «значительное снижение» числа опытов и соответственно времени проведения эксперимента, представляется в виде:

$$\tilde{A}_1 = \{ \dots, \langle 1/100 \rangle, \dots, \langle 1/11 \rangle, \langle 1/10 \rangle, \langle 0,5/5 \rangle, \dots, \langle 0,1/2 \rangle, \langle 0/1 \rangle \}. \quad (8)$$

Аппроксимирующая функция принадлежности $\mu_a(F)$, соответствующая выражению (8), приведена на рисунке.

Оперативность обработки информации можно определить следующим образом

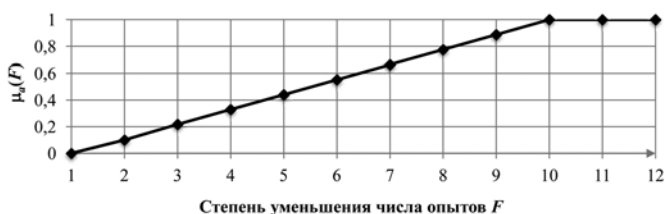
$$k_o = T^0/T^A, \quad (9)$$

где T^A — время обработки данных с использованием АСНИ ЖОДГ; T^0 — время обработки при существующих информационных технологиях.

Время обработки данных зависит от технических характеристик используемого аппаратного, информационно-программного обеспечения, организации хранения и доступа к информационным ресурсам и др. Значения показателя k_o определяются аналогично методики вычисления значений показателя k_{de} .

Доступность информации — качественный показатель, определяется экспертами на основе анализа опыта использования АСНИ ЖОДГ, удобства использования и полноты информации, необходимой для проведения НИ.

Значения весовых коэффициентов для расчета показателя (6) экспертно определены следующим образом: $\alpha_1 = 0,3$; $\alpha_2 = 0,4$; $\alpha_3 = 0,3$.



Функция принадлежности $\mu_a(F)$

Показатели, характеризующие ресурсоотдачу НИ

$$k_{rc} = \beta_1 k_{lp} + \beta_2 k_p, \quad (10)$$

где β_1, β_2 — весовые коэффициенты показателей; k_{lp} — показатель, характеризующий производительность труда; k_p — показатель, характеризующий рентабельность НИ.

Производительность труда НИ ОДГ определяется в виде отношения числа задач, решаемых в автоматизированном виде, к общему числу задач данного НИ:

$$k_{lp} = N_a/N_t, \quad (11)$$

где N_a — число автоматизированных задач; N_t — общее число задач.

Данный показатель является количественным, изменяется от 0 — полностью неавтоматизированное решение задач НИ, до 1 — полностью автоматизированное решение.

Рентабельность НИ k_p определяется через коэффициент возврата инвестиций в НИ R :

$$R = PV/CI, \quad (12)$$

где PV — суммарный денежный поток от проведенных НИ; CI — сумма инвестиций в НИ.

Если показатель $R > 1,30$, то НИ имеют сверхрентабельность; $k_p = 1$.

Если показатель $1,20 < R \leq 1,30$, то НИ имеют высокую рентабельность; $k_p = 0,6$.

Если показатель $1,05 < R \leq 1,20$, то НИ имеют среднюю рентабельность; $k_p = 0,3$.

Если показатель $1 < R \leq 1,05$, то НИ имеют низкую рентабельность; $k_p = 0,1$.

Если показатель $R = 1$, то затраты на НИ окупаются; $k_p = 0$.

Если показатель $R < 1$, то проведение НИ является убыточным; $k_p = 0$.

Значения весовых коэффициентов для расчета показателя (10) экспертно определены следующим образом: $\beta_1 = 0,7$; $\beta_2 = 0,3$.

Показатели, характеризующие результативность НИ

$$k_{ef} = \gamma_1 k_{mc} + \gamma_2 k_s + \gamma_3 k_{st} + \gamma_4 k_{dss}, \quad (13)$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ — весовые коэффициенты показателей; k_{mc} — показатель, характеризующий модельную полноту; k_s — показатель, характеризующий выбор технологий борьбы с обводнением; k_{st} — показатель, характеризующий используемый подход к организации НИ; k_{dss} — показатель, характеризующий использование системы поддержки принятия решений (СППР).

Значения весовых коэффициентов

Коэффициент	Значение	Примечание
λ_1	0,3	Время проведения
λ_2	0,3	Ресурсоотдача
λ_3	0,4	Результативность
α_1	0,3	Планирование эксперимента
α_2	0,4	Оперативность
α_3	0,3	Доступность
β_1	0,7	Производительность труда
β_2	0,3	Рентабельность
γ_1	0,3	Модельная полнота
γ_2	0,2	Предварительный выбор технологий борьбы с обводнением
γ_3	0,3	Используемый подход к организации НИ
γ_4	0,2	Использование системы поддержки принятия решений

Первым показателем, характеризующим результативность НИ, является степень модельного покрытия задач исследования:

$$k_{mc} = N_{mm}/N_t, \quad (14)$$

где N_{mm} — число задач НИ, поддерживаемых системой моделирования; N_t — общее число задач.

Показатель степени модельного покрытия определяется из принципа множественности моделей, описывающих один объект, и изменяется от 0 — при отсутствии модели, соответствующей тем или иным задачам, и до 1 — при полном покрытии всех задач исследования моделями.

Показатель k_s , характеризующий выбор технологий борьбы с обводнением для оценки, принимает значения: 0 — если выбор не используется, 1 — если используется предварительный отбор применимых технологий из всех доступных с учетом конструктивных и технологических особенностей ОДГ.

Показатель k_{sp} , характеризующий используемый подход к организации НИ, является количественным и может принимать значения: 0 — если используется подход без средств автоматизации процессов НИ, 0,5 — если используется автоматизированный подход при организации процессов НИ, 1 — если используется интегрированный подход при организации НИ (информационно-программные системы взаимосвязаны друг другом).

Показатель k_{dss} , характеризующий использование СППР, является количественным и может принимать значения: 0 — если СППР не используется, 1 — если используется СППР.

Значения весовых коэффициентов для расчета показателя (13) экспертно определены следующим образом: $\gamma_1 = 0,3$; $\gamma_2 = 0,2$; $\gamma_3 = 0,3$; $\gamma_4 = 0,2$.

Значения весовых коэффициентов сведены в табл. 1.

Таким образом, предложен критерий оценки эффективности НИ ОДГ, который может быть использован для сравнительной оценки влияния на них различных автоматизированных систем и информационных технологий.

Предложенный подход имеет свои недостатки, связанные с субъективностью многих оценок качественных показателей.

4. Оценка эффективности решения исследования живучести системы добычи газа с использованием АСНИ

Проведем последовательно сравнительную оценку эффективности НИ при решении задачи ЖОДГ на базе АСНИ и известных автоматизированных систем по предложенному критерию (1) на базе результатов из табл. 1.

Автору не известны используемые альтернативные АСНИ в газодобывающей отрасли.

Поэтому под известными автоматизированными системами обобщена оценка эффективности НИ при решении задачи ЖОДГ на базе существующего специализированного программного обеспечения для моделирования системы добычи углеводородного сырья:

- PIPESIM (компания Schlumberger) представляет собой симулятор многофазного установившегося потока от пласта до устья скважины, позволяет выполнять оптимизацию механизированной добычи;

- PROSPER (Petroleum Experts) — инструмент для моделирования скважин и трубопроводов, позволяет подбирать оборудование для механизированной добычи с учетом конструкции скважины, характеристики притока к забою; доступна база данных оборудования (насосов, клапанов, электродвигателей и т. д.);

- tNavigator (RFD), модуль «Дизайнер скважин» является частью интегрированного геологического симулятора, предназначен для моделирования скважин с учетом конструкции и траектории, свойств флюида и характеристик притока углеводородов из продуктивного пласта;

- программный комплекс Автотехнолог (ООО «ЦОНИК им. И. М. Губкина») предназначен для подбора и оптимизации оборудования нефтяной скважины; позволяет рассчитывать показатели

системы «нефтяной пласт—скважина—насосная установка» на основе авторских методик.

Рассмотренное выше коммерческое информационно-программное обеспечение (с закрытым программным кодом) предназначено для подбора оборудования механизированной добычи из нефтяных скважин по однорядному лифту (по насосно-компрессорным трубам или межтрубному пространству) и не позволяет моделировать технологии борьбы с обводнением и исследовать ЖОДГ газоконденсатного месторождения. Также отсутствует возможность интеграции данных продуктов в существующую на предприятии информационно-программную инфраструктуру, их модификации и самостоятельной разработки дополнительного функционала.

Определены значения частных показателей эффективности процессов НИ ОДГ с использованием зависимостей (2)—(14).

1. Время проведения НИ.

Определен показатель снижения числа опытов вычислительного эксперимента k_{de} при использовании методов планирования экспериментов по формуле (7):

$$F = N_0/N_{de} = 121/72 = 6.$$

Для найденного значения F по графику, приведенному на рисунке, определено значение показателя, характеризующего временной эффект от применения методов планирования эксперимента:

- при использовании известных систем (далее для всех показателей, характеризующих известные системы, используется индекс «0»): $k_{de}^0 = 0,2$;

- для АСНИ ЖОДГ (далее для всех показателей, характеризующих АСНИ ЖОДГ, используется индекс «А»): $k_{de}^A = 0,6$.

Оперативность обработки информации за счет использования в АСНИ ЖОДГ современного аппаратного и информационно-программного обеспечения, организации эффективного доступа к информационным ресурсам оценивается экспертно с учетом формулы (9) в интервале от 0 до 1: $k_o^0 = 0,2$; $k_o^A = 0,7$.

Доступность информации определена на базе опыта использования АСНИ ЖОДГ при решении задач оценки ЖОДГ и оценки эргономичности пользовательского интерфейса в следующем виде: $k_a^0 = 0,3$; $k_a^A = 0,7$.

В результате оценки по формуле (6) показатель, характеризующий время проведения НИ, принимает следующие значения:

- при использовании известных автоматизированных систем:

$$k_t^0 = 0,3 \cdot 0,2 + 0,4 \cdot 0,2 + 0,3 \cdot 0,3 = 0,23;$$

- при использовании АСНИ ЖОДГ:

$$k_t^A = 0,3 \cdot 0,6 + 0,4 \cdot 0,7 + 0,3 \cdot 0,7 = 0,67.$$

2. Ресурсоотдача НИ.

За счет использования АСНИ часть процессов НИ, связанных с операциями обработки информации, автоматизируется, что приводит к повышению производительности труда исследователя (он выполняет большее число операций за единицу рабочего времени). Автоматизированы процессы исследования ЖОДГ за счет разработки нового информационно-программного обеспечения, которое отсутствует в существующих автоматизированных системах.

Производительность труда НИ ОДГ определим по формуле (11):

- при использовании известных автоматизированных систем:

$$k_{lp}^0 = 8/24 = 0,3;$$

- при использовании АСНИ ЖОДГ:

$$k_{lp}^A = 17/24 = 0,7.$$

Коэффициент возврата инвестиций в НИ определен на основе опыта использования АСНИ ЖОДГ по формуле (12), найдена рентабельность НИ: $k_p^0 = 0,3$; $k_p^A = 0,6$.

В результате оценки по формуле (10) показатель, характеризующий ресурсоотдачу НИ, принимает следующие значения:

- при использовании известных автоматизированных систем:

$$k_{rc}^0 = 0,7 \cdot 0,3 + 0,3 \cdot 0,3 = 0,30;$$

- при использовании АСНИ ЖОДГ:

$$k_{rc}^A = 0,7 \cdot 0,7 + 0,3 \cdot 0,6 = 0,67.$$

3. Результативность НИ.

Степень модельного покрытия оцениваем по формуле (14):

- при использовании известных автоматизированных систем:

$$k_{mc}^0 = 12/20 = 0,6;$$

- при использовании АСНИ ЖОДГ:

$$k_{mc}^A = 16/20 = 0,8.$$

Показатель, характеризующий выбор технологий борьбы с обводнением, оценим:

Значения показателей эффективности по вариантам с АСНИ ЖОДГ и с использованием известных автоматизированных систем

Обозначение	Значение	Примечание
k_t^0	0,23	Время проведения НИ
k_t^A	0,67	
k_{rc}^0	0,30	Ресурсоотдача НИ
k_{rc}^A	0,67	
k_{ef}^0	0,33	Результативность НИ
k_{ef}^A	0,94	

• при использовании известных автоматизированных систем:

$$k_s^0 = 0;$$

• при использовании АСНИ ЖОДГ, позволяющей осуществлять предварительный отбор применимых технологий из всех доступных с учетом конструктивных и технологических особенностей ОДГ:

$$k_s^A = 1.$$

Показатель, характеризующий используемый подход к организации НИ, определен следующим образом:

• для известных автоматизированных систем, использующих автоматизированный подход при организации процессов НИ:

$$k_{st}^0 = 0,5;$$

• для АСНИ ЖОДГ, использующей интегрированный подход при организации НИ:

$$k_{st}^A = 1.$$

Так как в известных автоматизированных системах НИ СППР не используется, то показатель, характеризующий использование СППР, $k_{dss}^0 = 0$; для АСНИ ЖОДГ, использующей СППР, $k_{dss}^A = 1$.

В результате оценки по формуле (13) показатель, характеризующий результативность НИ, принимает следующие значения:

• при использовании известных автоматизированных систем:

$$K_{ef}^0 = 0,3 \cdot 0,6 + 0,2 \cdot 0 + 0,3 \cdot 0,5 + 0,2 \cdot 0 = 0,33;$$

• при использовании АСНИ ЖОДГ:

$$K_{ef}^A = 0,3 \cdot 0,8 + 0,2 \cdot 1 + 0,3 \cdot 1,0 + 0,2 \cdot 1,0 = 0,94.$$

Значения показателей, характеризующих составные части эффективности при решении задач НИ ОДГ, сведены в табл. 2.

Коэффициенты эффективности НИ рассчитываются по зависимости (2) с учетом значений весовых коэффициентов (табл. 1) и показателей (табл. 2):

$$K_{esc}^0 = 0,3 \cdot 0,23 + 0,3 \cdot 0,30 + 0,4 \cdot 0,33 = 0,29;$$

$$K_{esc}^A = 0,3 \cdot 0,67 + 0,3 \cdot 0,67 + 0,4 \cdot 0,94 = 0,78.$$

Таким образом, использование АСНИ живучести объектов добычи газа при решении задачи

научных исследований живучести повышает эффективность таких исследований более чем в 2 раза за счет увеличения их результативности и ресурсоотдачи, а также снижения времени проведения исследований.

5. Оценка управленческого эффекта от использования АСНИ

Согласно методическим рекомендациям [29] разработка АСНИ ЖОДГ относится к научным проектам с управленческим эффектом (далее — НТР-У), так как в результате работы применены новые технические средства в управлении (средства обработки и хранения информации); внедрены новые компьютерные программы и система поддержки управленческих решений; внесены изменения в информационные технологии, структуру и содержание информации; введены новые показатели; внесены изменения в структуру и содержание баз данных. Проведена оценка эффективности АСНИ [29]. Результаты оценки представлены в табл. 3.

Полученные результаты свидетельствуют о положительном управленческом эффекте при использовании АСНИ ЖОДГ, при этом отмечается: повышение эффективности НИ и принимаемых решений; повышение коэффициента эксплуатации и живучести ОДГ за счет выбора технологии

Результаты оценки управленческого эффекта

Показатель	Значение
Оценка изменений в объекте управления	0,0196
Оценка усилий в субъекте управления	0,2292
Показатель качества НТР-У	16,4
Коэффициент результативности НТР-У	1,3994

борьбы с обводнением; улучшение имиджа эксплуатирующей организации за счет повышения коэффициента извлечения углеводородов и применения в производственной деятельности современных цифровых технологий.

Заключение

Определены основные особенности НИ ЖОДГ. Показана нечеткая природа характеристик эффективности НИ ЖОДГ. Обоснован выбор метода оценки эффективности на основе теории нечетких множеств.

Определены обобщенные показатели эффективности НИ ЖОДГ: время проведения, ресурсоотдача и результативность. На основе интегрального показателя предложен критерий оценки эффективности НИ ЖОДГ.

Проведена сравнительная оценка эффективности НИ ЖОДГ с использованием АСНИ и на базе известных автоматизированных систем. Результаты оценки свидетельствуют об эффективности разработанной АСНИ, так как коэффициент эффективности НИ при использовании АСНИ увеличивается более чем в 2 раза с $K_{esr}^0 = 0,29$ до $K_{esr}^A = 0,78$.

Проведена оценка управленческого эффекта при использовании АСНИ ЖОДГ [29], свидетельствующая о положительном управленческом эффекте от использования разработанной системы.

Дальнейшие исследования необходимо направить на решение проблемы оптимального выбора обводненных скважин-кандидатов на месторождении для оснащения средствами обеспечения живучести в целях повышения эффективности работы всего фонда скважин, провести оценку влияния средств обеспечения живучести на соседние скважины.

Список литературы

1. **Валеев А. Ф.** Автоматизированная система научных исследований для повышения живучести системы добычи газа в условиях обводнения скважин // XV Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса»: сб. тр. 2022. С. 257–266. URL: https://neftegaz.gubkin.ru/site/assets/files/4498/15akt_sbornik_trudov.pdf (дата обращения 16.07.2023).
2. **Андреев А. Ф., Зубарева В. Д., Саркисов А. С.** Оценка эффективности и рисков инновационных проектов нефтегазовой отрасли: учеб. пособ. для студентов высших учебных заведений. М.: МАКС Пресс, 2007. 238 с.
3. **Аникейчик Н. Д., Кинжагулов И. Ю., Федоров А. В.** Планирование и управление НИР и ОКР: учеб. пособие. СПб: Университет ИТМО, 2016. 192 с.

4. **Фомичев Н. И.** Автоматизированные системы научных исследований: уч. пособ. Ярославль, 2001. 112 с.
5. **Кузьмин Е. В.** Эффективность информационных технологий. Конспект лекций. Самара: Изд-во ПГУТИ, 2013. 131 с.
6. **Бизянов Е. Е., Мотченко Л. А.** Эффекты от инноваций в информационную инфраструктуру современного экономического объекта // Экономический вестник ДонГТИ. 2022. № 12. С. 50–57.
7. **Волик Б. Г., Рябинин И. А.** Эффективность, надежность и живучесть управляющих систем // Автоматика и телемеханика. 1984. № 12. С. 151–160.
8. **Грановский Ю. В.** Об оценке эффективности научных исследований // Научно-технические исследования: сб. науч. трудов. М.: Институт научной информации по общественным наукам РАН, 2008. С. 58–71.
9. **Васильева Е. В., Данилова О. М., Лобанова Н. М.** Оценка эффективности информационных технологий/информационных систем: учеб. пособие. М.: ГУУ, 2006. 164 с.
10. **Ермакова Ж. А., Пергунова О. В.** Экономическая эффективность информационно-коммуникационных технологий на промышленных предприятиях: монография; Рос. акад. наук, Урал. отд-ние, Ин-т экономики. Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 2017. 202 с.
11. **Середенко Е. С.** Оценка экономической эффективности аналитических информационных систем: дис. ... канд. экон. наук. М., 2014. 166 с.
12. **Скрипкин К. Г.** Экономическая эффективность информационных систем в России: Монография. М.: МАКС Пресс, 2014. 156 с.
13. **Скрипкин К. Г.** Экономика информационных продуктов и услуг: Учебник. М.: Экономический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, 2019. 192 с.
14. **Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов**, вторая редакция, исправленная и дополненная, (утв. Минэкономки РФ, Минфином РФ и Госстроем РФ от 21.06.1999, № ВК 477). URL: <https://base.garant.ru/2320803/> (дата обращения 16.07.2023).
15. **Ish D., Ettinger J., Ferris C.** Evaluating the Effectiveness of Artificial Intelligence Systems in Intelligence Analysis. 2021. URL: https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RR400/RR464-1/RAND_RRA464-1.pdf (дата обращения 10.03.2023).
16. **Yao Y. Ch.** Research on effectiveness evaluation method and application of quality management system of manufacturing enterprise based on interval-valued hesitation fuzzy set. 2017. URL: <https://www.extrica.com/article/18937> (дата обращения 10.03.2023).
17. **ГОСТ 24.702—85** Межгосударственный стандарт. Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Эффективность автоматизированных систем управления. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2009.
18. **Надежность и эффективность в технике: Справочник.** В 10 т. Т. 3. Эффективность технических систем / Под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.
19. **Зацаренный А. А., Ионенков Ю. С.** Некоторые аспекты оценки эффективности и качества информационных систем. URL: <https://www.cs.vsu.ru/ipmt-conf/conf/2022/works/5.%20Прикладное%20моделирование%20и%20E-business/1888.pres.pdf> (Дата обращения 10.03.2023).
20. **Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С.** К вопросу оценки эффективности автоматизированных систем с использованием метода анализа иерархий // Системы и средства информатики. 2015. Том 25, № 3. С. 161–178. DOI: 10.14357/08696527150310.
21. **Петухов Г. Б., Якунин В. И.** Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М.: АСТ, 2006. 504 с.

22. Соловьев Н. А., Чернопродова Е. Н., Тишина Н. А., Валеев А. Ф. Исследования операций в задачах программной инженерии: уч. пособие. СПб: Лань, 2019. 164 с.

23. Яшин В. Н. Оценка эффективности автоматизированных информационных систем // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2017. № 3 (55). С. 43—49.

24. Kaplan R. S., Norton D. P. The balanced scorecard: translating strategy into action. Harvard Business Review Press, 1996. 336 с.

25. Дедков В. К. Принципы формирования критериев и показателей эффективности функционирования сложных технических систем // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 4. С. 3—8.

26. Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С. Оценка эффективности информационно-телекоммуникационных систем. М.: НИПКЦ Восход-А, 2020. 120 с.

27. Суворов А. И. Комплексная автоматизированная система научных исследований сложных морских объектов: дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 1999. 174 с.

28. СТО Газпром 097-2011 Автоматизация. Телемеханизация. Автоматизированные системы управления технологическими процессами добычи, транспортировки и подземного хранения газа. Основные положения. URL: <https://samara-tr.gazprom.ru/d/textpage/8e/142/sto-gazprom-097-2011-avtomatizatsiya.-telemekhanizatsiya.-osnovn.pdf> (дата обращения 10.03.2023).

29. Р Газпром 045-2008 «Методические рекомендации по критериям и оценке управленческого эффекта от использования научно-исследовательских разработок». 2008. URL: https://www.gubkin.ru/general/structure/upravlenie-strategicheskogo-razvitiya/podgotovka-komplekta-otchetnykh-materialov/files/2020-03-30/r_gazprom_045_2008_2019_04_23.pdf (дата обращения 10.03.2023).

Evaluation of the Automated System of Scientific Research on the Survivability of Gas Production Facilities Effectiveness

A. F. Valeev, Ph.D., Head of Geological and Hydrodynamic Simulation Department, vafw@yandex.ru, Gazprom Dobycha Orenburg, Orenburg, 460018, Russian Federation

Corresponding author:

Artem F. Valeev, Head of Geological and Hydrodynamic Simulation Department, Gazprom Dobycha Orenburg, Orenburg, 460018, Russian Federation, E-mail: vafw@yandex.ru

Received on June 15, 2023

Accepted on July 17, 2023

In this article, the existing approaches to evaluating the effectiveness of automated research systems are considered. The choice of the evaluation method is justified and a criterion for evaluating the effectiveness of scientific studies of the survivability of gas production facilities is developed, taking into account generalized indicators: research time, resource efficiency, effectiveness. Based on expert assessments, the values of the coefficients of the significance of performance indicators are determined. The efficiency of scientific research on the survivability of gas production using existing automation systems and the proposed one has been evaluated. The analysis of the evaluation results showed an increase in the effectiveness of scientific research of survivability according to the integral criterion with the use of a new automated system by more than 2 times, which indicates the effectiveness of the developed software, methodological and informational support of such a system.

Keywords: efficiency, automated system, scientific research, gas production facility, survivability, assessment, indicator, criterion

For citation:

Valeev A. F. Evaluation of the Automated System of Scientific Research on the Survivability of Gas Production Facilities Effectiveness, *Programmnaya Ingeneria*, 2023, vol. 14, no. 9, pp. 431—441. DOI: 10.17587/prin.14.431-441.

References

1. Valeev A. F. Automated system of scientific research to increase the survivability of the gas production system in conditions of well flooding, *XV All-Russian Scientific and Technical conference «Actual problems of the development of the oil and gas complex»*, Moscow, 2022, pp. 257—266, available at: [https://neftegaz.gubkin.](https://neftegaz.gubkin.ru/site/assets/files/4498/15akt_sbornik_trudov.pdf)

[ru/site/assets/files/4498/15akt_sbornik_trudov.pdf](https://neftegaz.gubkin.ru/site/assets/files/4498/15akt_sbornik_trudov.pdf) (date of access 16.07.2023) (in Russian).

2. Andreev A. F., Zubareva V. D., Sarkisov A. S. *Ocenka effektivnosti i riskov innovacionnykh proektov neftegazovoj otrasli: uchebnoe posobie dlya studentov vysshih uchebnykh zavedenij*: textbook for students of higher educational institutions, Moscow, MAKS Press, 2007, 238 p. (in Russian).

3. **Anikeychik N. D., Kinzhagulov I. Yu., Fedorov A. V.** *Planirovanie i upravlenie NIR i OKR: studies*. stipend. St. Petersburg, ITMO University, 2016, 192 p. (in Russian).
4. **Fomichev N. I.** *Avtomatizirovannyye sistemy nauchnyh issledovaniy: teaching aid*. Yaroslavl, 2001, 112 p. (in Russian).
5. **Kuz'min E. V.** *Effektivnost' informacionnyh tekhnologij*. Konspekt lekcij. Samara: Izd-vo PGUTI, 2013, 131 p. (in Russian).
6. **Bizyanov E. E., Motchenko L. A.** Effects of innovations in the information infrastructure of a modern economic object, *Ekonomicheskij vestnik DonGTI*, 2022, no. 12, pp. 50–57 (in Russian).
7. **Volik B. G., Ryabinin I. A.** Efficiency, reliability and survivability of control systems, *Avtomatika i telemekhanika*, 1984, no. 12, pp. 151–160 (in Russian).
8. **Granovsky Yu. V.** On the evaluation of the effectiveness of scientific research, *Naukovedcheskie issledovaniya*, sb. nauch. trudov. Moscow, Institut nauchnoj informacii po obshhestvennym naukam RAN, 2008, pp. 58–71 (in Russian).
9. **Ermakova Zh. A., Pergunova O. V.** *Ekonomicheskaya effektivnost' informacionno-kommunikacionnyh tekhnologij na promyshlennyh predpriyatiyah: monograph*. Yekaterinburg, Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2017, 202 p. (in Russian).
10. **Vasilyeva E. V., Danilova O. M., Lobanova N. M.** *Ocenka effektivnosti informacionnyh tekhnologij/informacionnyh sistem: textbook. manual*. Moscow, GUU, 2006, 164 p. (in Russian).
11. **Seredenko E. S.** Ocenka ekonomicheskoy effektivnosti analiticheskikh informacionnyh sistem. Dis. ... kand. ekon. nauk. Moscow, 2014, 166 p. (in Russian).
12. **Skripkin K. G.** *Ekonomicheskaya effektivnost' informacionnyh sistem v Rossii: monograph*. Moscow, MAX Press, 2014, 156 p. (in Russian).
13. **Skripkin K. G.** *Ekonomika informacionnyh produktov i uslug: textbook*. Moscow, Faculty of Economics of Lomonosov Moscow State University, 2019, 192 p. (in Russian).
14. **Metodicheskie rekomendacii po ocenke effektivnosti investicionnyh proektov** (Vtoraya redakciya, ispravlenaya i dopolnennaya) (utv. Minekonomiki RF, Minfinom RF i Gosstroem RF ot 21.06.1999, № VK 477). URL: <https://base.garant.ru/2320803/> (date of access 16.07.2023) (in Russian).
15. **Ish D., Ettinger J., Ferris C.** Evaluating the Effectiveness of Artificial Intelligence Systems in Intelligence Analysis. 2021, available at: https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RR4400/RR4464-1/RAND_RR4464-1.pdf (date of access 10.03.2023).
16. **Yao Y. Ch.** Research on effectiveness evaluation method and application of quality management system of manufacturing enterprise based on interval-valued hesitation fuzzy set. 2017, available at: <https://www.extrica.com/article/18937> (date of access 10.03.2023).
17. **GOST 24.702—85** Mezhgosudarstvennyj standart. Edinaya sistema standartov avtomatizirovannyh sistem upravleniya. Effektivnost' avtomatizirovannyh sistem upravleniya. Osnovnye polozeniya, Moscow, Standartinform, 2009 (in Russian).
18. **Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike**. Vol. 3. Effektivnost' tekhnicheskikh sistem / Eds by V. F. Utkin, Yu.V. Kryuchkova, Moscow, Mashinostroenie, 1988, 328 p. (in Russian).
19. **Nekotorye aspekty ocenki effektivnosti i kachestva informacionnyh sistem**, available at: <https://www.cs.vsu.ru/ipmt-conf/conf/2022/works/5.%20Прикладное%20моделирование%20и%20E-business/1888.pres.pdf> (date of access 10.03.2023) (in Russian).
20. **Zatsarinny A. A., Iononkov Yu. S.** On the issue of evaluating the effectiveness of automated systems using the hierarchy analysis method, *Sistemy i sredstva informatiki*, 2015, vol. 25, no. 3, pp. 161–178. DOI: 10.14357/08696527150310 (in Russian).
21. **Petukhov G. B., Yakunin V. I.** *Metodologicheskie osnovy vneshnego proektirovaniya celenapravlennyh processov i celeustremlyennyh sistem*, Moscow, AST Publ., 2006, 504 p. (in Russian).
22. **Soloviev N. A., Chernoprudova E. N., Tishina N. A., Valeev A. F.** *Issledovaniya operacij v zadachah programnoj inzhenerii*, St. Petersburg, Lan, 2019, 164 p. (in Russian).
23. **Yashin V. N.** Evaluation of the effectiveness of automated information systems, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki*, 2017, no. 3 (55), pp. 43–49 (in Russian).
24. **Kaplan R. S., Norton D. P.** *The balanced scorecard: translating strategy into action*, Harvard Business Review Press, 1996, 336 p.
25. **Dedkov V. K.** Principles of formation of criteria and performance indicators of complex technical systems, *Nadezhnost' i kachestvo slozhnyh sistem*, 2013, no. 4, pp. 3–8 (in Russian).
26. **Zatsarinny A. A., Iononkov Yu. S.** *Ocenka effektivnosti informacionno-telekommunikacionnyh sistem*, Moscow, NIPCC Voskhod-A, 2020, 120 p. (in Russian).
27. **Suvorov A. I.** Kompleksnaya avtomatizirovannaya sistema nauchnyh issledovaniy slozhnyh morskikh ob'ektov: Dis. ... dokt. tekhn. nauk. St. Petersburg, 1999, 174 p. (in Russian).
28. **STO Gazprom 097-2011 Avtomatizaciya. Telemekhanizaciya. Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi processami dobychi, transportirovki i podzemnogo hraneniya gaza**. Osnovnye polozeniya, available at: <https://samara-tr.gazprom.ru/d/textpage/8e/142/sto-gazprom-097-2011-avtomatizatsiya.-telemekhanizatsiya.-osnovn.pdf> (date of access 10.03.2023) (in Russian).
29. **R Gazprom 045-2008 Metodicheskie rekomendacii po kriteriyam i ocenke upravlencheskogo efekta ot ispol'zovaniya nauchno-issledovatel'skikh razrabotok**, 2008 https://www.gubkin.ru/general/structure/upravlenie-strategicheskogo-razvitiya/podgotovka-komplekta-otchetnykh-materialov/files/2020-03-30/r_gazprom_045_2008_2019_04_23.pdf (date of access 10.03.2023) (in Russian).

Mathematical Modeling Method for Detecting the Fuzzy Occurrence of Dangerous Events

G. E. Rego, Postgraduate Student, Scientist, regoGr@yandex.ru,
Institute of Mathematics and Information Technology, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk,
185910, Russian Federation

Corresponding author:

Grigoriy E. Rego, Postgraduate Student, Scientist,
Institute of Mathematics and Information Technology, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, 185910,
Russian Federation
E-mail: regoGr@yandex.ru

Received on June 16, 2023

Accepted on July 11, 2023

The article describes a mathematical modeling method for detecting the fuzzy occurrence of dangerous events. A distinctive feature of this study is the assessment of the occurrence of dangerous events based on the use of fuzzy sets. Each dangerous event is associated with a subset of the set of sensors. The data is converted into some characteristics of the occurrence of an event, which are then fed to the input of the membership function of a set of dangerous events. In addition, an example of the application of this mathematical model is given, demonstrating its advantages and possibilities for its expansion. The appendix contains a table of possible dangerous events associated with the functioning of the forest robot. The presented model can also be used to detect the fuzzy occurrence of dangerous events associated with human movement. The developed mathematical modeling method for detecting the occurrence of dangerous events has many applications. In particular, it contributes to the creation of a digital assistant to expand the capabilities of the senses of a remote human operator, and can also be used to control a mobile robot.

Keywords: mobile robot, mathematical modeling method, fuzzy set, digital assistant, forest robot

Acknowledgement. *The research is implemented with financial support by Russian Science Foundation, project no. 22-11-20040 (<https://rscf.ru/en/project/22-11-20040/>) jointly with Republic of Karelia and funding from Venture Investment Fund of Republic of Karelia (VIF RK).*

For citation:

Rego G. E. Mathematical Modeling Method for Detecting the Fuzzy Occurrence of Dangerous Events, *Programmная Ingeneria*, 2023, vol. 14, no. 9, pp. 442—451. DOI: 10.17587/prin.14.442-451.

УДК 519.8

DOI: 10.17587/prin.14.442-451

Г. Э. Перо, аспирант, ст. препод. кафедры, науч. сотр., regoGr@yandex.ru,
Институт математики и информационных технологий, Центр искусственного интеллекта,
Петрозаводский государственный университет

Метод математического моделирования для детектирования нечеткого возникновения опасных событий

Поступила в редакцию 16.06.2023

Принята к публикации 11.07.2023

Описан метод математического моделирования для обнаружения нечеткого возникновения опасных событий. Отличительной особенностью данного исследования является оценка возникновения опасных событий на основе использования нечетких множеств. Каждое опасное

событие связано с подмножеством набора датчиков. Данные преобразуются в некоторые характеристики наступления события, которые затем подаются на вход функции принадлежности множества опасных событий. Кроме того, приведен пример применения данной математической модели, демонстрирующий ее преимущества и возможности ее расширения. Приложение содержит таблицу возможных опасных событий, связанных с функционированием лесного робота. Представленная модель также может быть использована для обнаружения нечеткого возникновения опасных событий, связанных с движением человека. Разработанный метод математического моделирования обнаружения возникновения опасных событий имеет множество приложений. В частности, он способствует созданию цифрового помощника для расширения возможностей органов чувств удаленного человека-оператора, а также может использоваться для управления мобильным роботом.

Ключевые слова: мобильный робот, метод математического моделирования, нечеткое множество, цифровой ассистент, лесной робот

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-20040 (<https://rscf.ru/project/22-11-20040/>), проводимого совместно с Республикой Карелия с финансированием из Фонда венчурных инвестиций Республики Карелия (ФВИ РК).

Для цитирования:

Rego G. E. Mathematical Modeling Method for Detecting the Fuzzy Occurrence of Dangerous Events // Программная инженерия. 2023. Том 14, № 9. С. 442—451. DOI: 10.17587/prin.14.442-451.

Introduction

An autonomous mobile robot (AMR) is a system operating in an unpredictable and partially unknown environment [1]. The main tasks associated with the work of AMR are navigation and localization. Navigation is the task of constructing a route from a starting point to a destination. Localization implies the possession of information about where the object is at a given time.

Mobile robots are often classified according to the type of movers, such as wheeled, tracked, walking, etc. [2]. Each type of robot has advantages and disadvantages. It is associated with the low population density of the northern territories, low wages in reforestation, as well as seasonality, when a large amount of work needs to be completed in a short time.

Mathematical models describing the movement of mobile robots with different arrangement of wheels are also described earlier [3]. The main idea of motion description includes a geometric representation of the robot's position in space, as well as a description of control actions. In this article, mathematical models of AMR motion will not be the subject of consideration. We will assume that the task of motion control is carried out by one of the methods described in the scientific literature [4].

The subject of the article is the relationship between the parameters of some object and dangerous events, the occurrence of which is fuzzy and must be monitored. For example, the object could be a person with a digital assistant or a mobile robot. The object parameters are calculated by converting the data received from the

sensors. We will call such mathematical models event-based models.

The article describes a mathematical modeling method that can be adapted to solve a wide range of problems and used to detect occurrence of events related to either the object or the external environment. Another difference between this method and those used earlier is fuzzy events. The occurrence of the event is non-binary. The degree of occurrence of an event is determined by the membership function.

The rest of the paper is organized as follows: Section 1 describes related work on this issue. Section 2 describes the problem that requires the mathematical modeling method. Section 3 describes the formal mathematical modeling method. Section 4 describes the algorithm for applying the mathematical model built using the proposed method. Section 5 gives an example of using the described method. In conclusion, the essence of the work performed is briefly described and possible continuation of research in this direction is analyzed. The appendix contains a list of possible dangerous events that can occur during the operation of a forest robot, and their brief analysis. Forest robot is a mobile robotic modular system designed for reforestation and thinning operations.

1. Related works

Event mathematical models for controlling the movement of a mobile robot have already been studied earlier. The authors of the study [5] use a threshold curve or a threshold range as a criterion for checking the

occurrence of an event. At the same time, they apply a binary approach: the event either happened or it did not. Such a solution has its advantages in terms of reducing the computational and communication load without compromising management efficiency. However, as will be shown below, this approach cannot always be implemented in practice.

Another possible application of the event-based mathematical model is the detection of intrusions by a mobile robot while moving along a rectangular perimeter [6]. In this case, the event is not connected directly with the robot but with some external object. Intrusions occur at a random point along the perimeter of the rectangle and stay at that point for a random amount of time. A purpose of the robot is to detect this intrusion. At the same time, the robot has the ability to move around the perimeter of the rectangle and at each moment of time sees only some part of the rectangle.

The described model is stochastic but not fuzzy. The difference between “fuzzy” and “probable” occurrence of events is that probability determines the likelihood of an event occurring. At the same time, the event itself remains quite definite. A fuzzy event implies that it is impossible to accurately understand its occurrence boundaries, so the degree of occurrence of the event is estimated. Below is an example with remaining fuel and dangerous heeling, which demonstrates the idea of a fuzzy occurrence of event.

There are studies that use fuzzy logic to control the movement of a mobile robot. For example, in the article [7] an approach is presented in which, using a set of rules, an attempt is made to simulate the behavior of a person driving. Other researchers have dealt with the problem of obstacle avoidance by a mobile robot using fuzzy logic [8]. Various approaches to the path tracking problem in the presence of kinematic and/or dynamic constraints have also been explored [9].

The term “autonomous” is used in the article because a robot capable of moving independently is being investigated. “Unmanned” refers to the absence of a human operator, while “autonomous” refers to a system’s ability to operate independently and make decisions without human intervention.

2. Description of the problem

Before introducing a formal mathematical modeling method it is necessary to describe the elements that will be included in it. We have some object. This object moves across some scene or map. In this paper it is assumed that the motion of an object is described in an arbitrary way. As a scene we will set a polygonal mesh (or a three-dimensional surface) with predefined boundaries. We will assume that there are impassable

obstacles along the boundaries of the polygonal grid (for example, ravines). Thus, the object cannot travel outside the predetermined area. An example of such an object could be a forest robot [10–12] or a person who needs a digital assistant [13].

The hardware and software architectures of the object can be modular. In this paper, we consider a sensor module (part of the hardware architecture), a control module and a module for collecting data from sensors (part of the software architecture). We define the control module as a node that is responsible for achieving the goal by the object. The goal is divided into several tasks. To achieve the described goal, an indicative list of tasks for forest robot would include:

- 1) calculation of the trajectory of movement;
- 2) trajectory stabilization;
- 3) recognition of obstacles;
- 4) detection of dangerous events;
- 5) calculation of control actions to minimize damage from dangerous events;
- 6) analysis of soil characteristics (moisture, density, etc.);
- 7) planting a seedling.

This list is approximate and may be expanded. The control module specifies a certain sequence of atomic actions, the execution of which should lead to the achievement of the goal. In the process of performing atomic actions, the control module makes adjustments in the event of any dangerous events from a predetermined set. The execution of the last atomic action from the sequence specified by the control module will be considered the criterion for achieving the goal. Achieving the goal is a process, and a process, by definition, occurs over time. During this time, some dangerous events may occur in the environment of the robot or with the robot itself.

Separately, it is worth dwelling on the definition of such a term as “event”, because it is complex. For example, in [14], events are understood as “phenomena that occur with machines in the production process or when interacting with people”. Events can be simple (occurring at a discrete point in time), long-term (lasting for a time interval) and composite (consisting of several consecutive or simultaneous simple or long-term events). The occurrence of the event is fuzzy.

We will understand events as a predetermined set of phenomena that can occur in the process of reaching the goal by the object, and the exact characteristics of the occurrence of which are unknown. In our mathematical model, events can be simple, long-term and composite. The determination of the occurrence of an event will be carried out using fuzzy sets.

The set of dangerous events in the mathematical model will be specified as a fuzzy set. We will

consider that a dangerous event has occurred if the membership function of the fuzzy set, which received the characteristics of the event as arguments, takes a value above a certain threshold. In this case, the threshold is set by the researcher in each specific case and can be both constant and variable. The occurrence of a dangerous event implies the need to implement a control action to minimize negative consequences. Due to the non-binary nature of the occurrence of events, it is possible to vary the degree of control action, depending on the level of occurrence of the event.

For example, such an event as “dangerous roll” for forest robot may be vague, because it is not possible to assess its danger only by the current angle of heel. We assume that we have defined the exact limit of dangerous heeling as α degrees. Then a roll of $\alpha - 1$ degrees is not dangerous, and the control module will ignore it. In this case, a situation may arise when at time t the heeling was equal to $\alpha - 1$ degrees, and at time $t - 1$ the heeling increased sharply and the control module did not have time to respond to this dangerous event. In this case, to generate a control action, it becomes expedient to use fuzzy logic. For example, the control module may generate a weak control input if the roll reaches $\alpha - 10$ degrees, a medium control input if the roll reaches $\alpha - 5$ degrees, and a maximum control input if the roll reaches α degrees.

An example of the binary nature of the occurrence of a dangerous event for forest robot is the occurrence of a shortage of fuel. Knowing that the robot should not move away from the starting point further than some predetermined distance, it is possible to determine what fuel balance should be considered critical, at which the robot should immediately move to the refueling point. In this case, the fuel reserve is calculated based on the upper limit of possible consumption. Also, some calculation error is added to the upper bound. Let the critical fuel value be estimated as δ . Then, if the remaining fuel $\leq \delta$, we will assume that the dangerous event has occurred. If the remaining fuel $> \delta$, then the dangerous event did not occur. A list of possible dangerous events associated with the forest robot is given in the appendix.

3. Mathematical modeling method for detecting the occurrence of dangerous events

We will describe the mathematical modeling method of what was discussed in the previous section. The scene is the locus of points, which can be described as follows: $R^3 = \{(x, y, f(x, y))\}$, where x is the x -coordinate, y is the y -coordinate, $f(x, y)$ is the z -coordinate. We set the position of the object as a point in space: $p = \{(x, y, f(x, y), \alpha, \beta, \gamma)\}$, where

$x, y, f(x, y)$ — position coordinates, and α, β, γ — orientation coordinates (roll, pitch, yaw).

The execution of tasks by the object takes place in time. All tasks performed by the object can be divided into service and auxiliary. Service tasks include those whose execution leads to the movement of the object or process equipment. All the rest are auxiliary tasks. We will denote the set of time points at which the detection of the occurrence of dangerous events is performed as $t = 1, 2, \dots, T$. The process of achieving the goal is finite. The mechanism for performing an event occurrence detection is described below.

The multiset with ordinal elements of atomic actions will be denoted as $A = \{a_i\}$. When we say multiset with ordinal elements, it means that the elements have a defined ordinal number. Atomicity means that the robot performs only one action at a time, such as moving forward. Atomic actions refer only to housekeeping tasks that the object performs. At the same time, the collection of data from sensors is an auxiliary task, so the actions associated with the collection are not included in the multiset A . The principle of operation of the control module is similar to the principle of process control in the operating system [15].

Sensors are placed on the object to obtain information about the environment, which we denote as a set of sets $S = \{S_j\}$, $j = 1, 2, \dots, n$, where n is the number of sensors. The set related to a specific sensor contains data from this sensor: $S_j = \{s_{j,t}\}$ where $t = 1, 2, \dots, T$. Each sensor S_j corresponds to some maximum allowable frequency of data collection at one time λ_j^* . The set of maximum admissible frequencies will be denoted as $\Lambda^* = \{\lambda_j^*\}$. We assume that the maximum allowable frequency of taking readings for any sensor is $\lambda_j^* \geq 1$.

In addition, we introduce the actual frequency of data collection by the sensor S_j at time t as a function of time: $\Lambda = \{\lambda_j(t)\}$. At any time t , inequality (1) is satisfied.

$$0 < \lambda_j(t) \leq \lambda_j^*. \quad (1)$$

If the frequency $\lambda_j(t) = 1$, then a specific sensor reading is used to determine the occurrence of an event. If $\lambda_j(t) > 1$, then it is possible to set the determination of the sensor readings in an arbitrary way, for example, to take the average value. If $\lambda_j(t) < 1$, then the last available sensor reading is used to determine the occurrence of an event. The value $\lambda_j(t)$ can be interpreted as the number of servings from sensor j at time t . It is assumed that the data received from a particular sensor is homogeneous. Examples of such sensors may be an accelerometer, a gyroscope, a range finder, etc. The forest robot sensor system [11] and specific sensors that can be used [16] have been described previously.

The set of events will be denoted as the set of sets $E = \{E_{i,t}\}$, $i = 1, 2, \dots, m$, where $E_{i,t}$ is the set of characteristics related to the i -th event. $E_{i,t}$ at time t are formed as a result of data conversion from sensors using function (2).

$$f_i(S_t): S_t \rightarrow E_{i,t}, E_{i,t} = \{e_{i,t,1}, e_{i,t,2}, \dots\}, \quad (2)$$

where $S_t = \{s_{1,t}, s_{2,t}, \dots, s_{n,t}\}$.

The occurrence of a dangerous event implies a high probability of a breakdown or critical failure that prevents the achievement of the goal within the next several points in time. Not all of the plurality of sensors may be used to detect the occurrence of a particular event. Such a possibility must be provided by the functions $f_i(S_t)$.

For example, the occurrence of dangerous AMR roll can be recognized using an accelerometer, a gyroscope, and a rangefinder. However, if a rangefinder is not available, then the occurrence of dangerous heeling can be detected using only an accelerometer and a gyroscope.

We will introduce a $g_i(E_{i,t})$ — a function that transforms the characteristics of the i -th event into a certain number $\omega_{i,t}$. Functions $g_i(E_{i,t})$ depend on a set of events and sensors and are determined at the stage of model initialization. Fuzzy set of dangerous events, which is formed at each moment of time t , as a set of pairs (event, function of belonging of an event to dangerous events) $E_t^* = \{\omega_{i,t}, \mu_i(\omega_{i,t})\}$. The membership function of a fuzzy set has the form of a piecewise constant function (3):

$$\mu_i(\omega_{i,t}) = \begin{cases} b_{i,1}, & \text{if } \omega_{i,t} \leq v_{i,1} \\ b_{i,2}, & \text{if } v_{i,1} < \omega_{i,t} \leq v_{i,2} \\ \dots & \dots \\ 1.0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (3)$$

$b_{i,k} \in [0, 1]$ — level of belonging of an event to dangerous events, and the inequalities $b_{i,1} < b_{i,2} < b_{i,3} \dots$ and $v_{i,1} < v_{i,2} < v_{i,3} \dots$ — some numbers determined based on the specifics of the values produced by the sensors. The membership function example above is not comprehensive. For example, values of received data from a certain range can be considered “normal”, and values outside this range (both to the left and to the right) indicate an increase in the level of occurrence of a dangerous event.

Handling dangerous events can be arbitrary. For example, the control action can be proportional to the obtained value of the membership function of the fuzzy set. The control module makes adjustments to the composition and order of atomic actions, and their execution continues.

To summarize the steps of the mathematical modeling method described:

- 1) define the scene as a locus of points in R^3 , where each point is described by its x , y , and z coordinates;
- 2) set the position of the object in space, including its position coordinates (x, y, z) and orientation coordinates (roll, pitch, yaw);
- 3) divide tasks performed by the object into service tasks (related to movement or process equipment) and auxiliary tasks;
- 4) define a set of time points at which the detection of dangerous events is performed;
- 5) create a multiset A of atomic actions performed by the object;
- 6) place sensors on the object to obtain information about the environment, represented as a set of sets S ;
- 7) define the maximum allowable frequency of data collection for each sensor as Λ^* ;
- 8) introduce the actual frequency of data collection by each sensor as a function of time, $\lambda_j(t)$, satisfying inequality (1);
- 9) determine how sensor readings are used to detect the occurrence of events using function (2);
- 10) recognize the occurrence of dangerous events based on the data conversion from sensors and their characteristics in (3).

The presented method allows build more detailed models related to specific tasks. The specific parameters of the model that must be taken into account depend both on the specifics of the tasks and on the environmental conditions in which the tasks are solved (soil composition, season, etc.).

4. Algorithm for detecting the occurrence of dangerous events

We will describe a formal algorithm for detecting the occurrence of dangerous events with a mathematical model constructed using the method described in the previous section (1)–(3). For the algorithm to work, it is not important how exactly the multiset A is calculated. The researcher have to determine the set of possible atomic actions and the method for obtaining their sequence in each specific case. We assume that the control module operates on the principle of a black box.

Algorithm for detecting the occurrence of dangerous events

Step 1. The parameters of the mathematical model are initialized:

$$R^3, p, T, A = \emptyset, S, n, m, \lambda_j^*, \lambda_j(t), E, f_i(S_t), g_i(E_{i,t}), \mu_i(\omega_{i,t}), E_t^*, b_{i,k}, v_{i,k}, t = 1.$$

Step 2. The control module calculates the multiset A , $T = |A|$.

Step 3. IF $\nexists a_i$ THEN End. ELSE an atomic action a_i is performed from the multiset A .

Step 4. Events characteristics $E_{i,t}$ where $i = 1, 2, \dots, m$, where m is a number of dangerous events, are calculated using $g_i(E_{i,t})$. The characteristics $\omega_{i,t}$ are calculated.

Step 5. The levels of belonging to dangerous events are calculated using the functions $\mu_i(\omega_{i,t})$, $t = t + 1$. Go to Step 2.

The mechanism for detecting the occurrence of a dangerous event is shown in Figure 1. The block diagram of the operation of the control module is shown in Figure 2.

The complexity of the algorithm for detecting the occurrence of dangerous events would depend on the specific implementation details, such as the number of events being monitored and the complexity of the calculations involved in steps 4 and 5.

As a first approximation, the complexity of the algorithm can be estimated as $O(E \cdot S \cdot T)$. In terms of space complexity, the algorithm would require memory to store the parameters and variables used in the calculations, as well as any data structures used to store the events and their characteristics. The space complexity would depend on the size of these data structures, which would vary depending on the specific application.

As for its use in real-time, the algorithm could be suitable for real-time applications if it can process events and calculate their characteristics within the required time constraints. The complexity analysis would help in assessing whether the algorithm can meet the performance requirements of a real-time system. Additionally, the algorithm's effectiveness in accurately detecting dangerous events would also be an important consideration in its use in real-time scenarios.

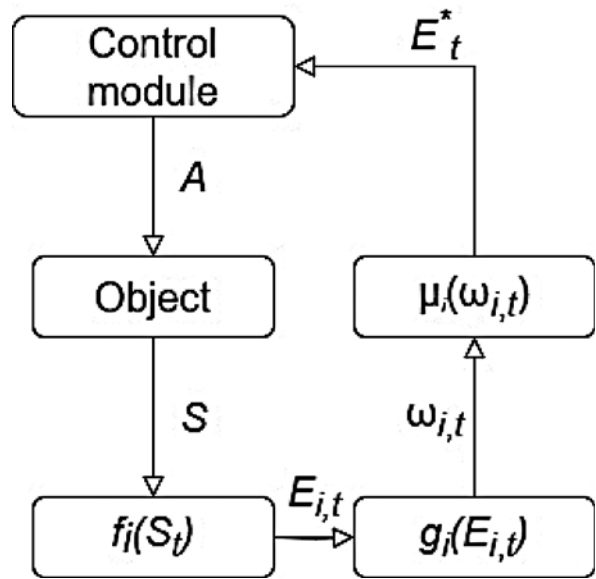


Figure 1. Scheme for detecting the occurrence of dangerous events

5. Example of a constructed mathematical model

Consider, as an example, a situation where the forest robot has to plant two saplings of a tree. As part of the example, some black-box abstractions will be used. For example, if an atomic action is called “forward movement”, then we do not consider the mechanism for performing this action at the physical level.

We will set the scene as $R^3 = \{(x, y, f(x, y) = 0)\}$. At the initial moment of time, the robot is at the point $p_0 = (x_0 = 0, y_0 = 0, f(x_0, y_0) = 0, \alpha_0 = 0, \beta_0 = 0, \gamma_0 = 0)$, it must reach the point $p_1 = (x_1 = 10, y_1 = 10, f(x_1, y_1) = 0, \alpha_1 = 0, \beta_1 = 0, \gamma_1 = 20)$ and plant a tree in the vicinity of the point p_1 .

Then the robot must reach the point $p_2 = (x_2 = 20, y_2 = 20, f(x_2, y_2) = 0, \alpha_2 = 0, \beta_2 = 0, \gamma_2 = 45)$, plant

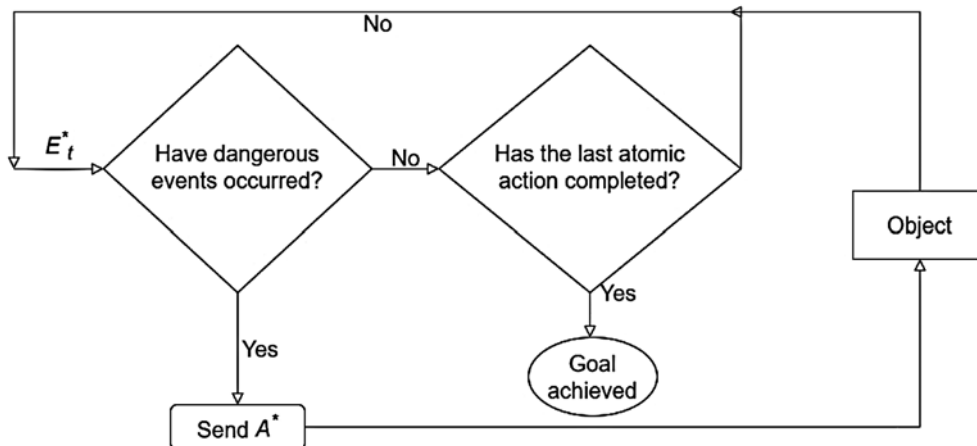


Figure 2. Block diagram of the control module

a tree in the vicinity of the point p_2 and return to p_0 . The neighborhood of some point is the set of all points that deviate in coordinates from p by no more than $\Delta p = (\delta_x, \delta_y, \delta_z, \delta_\alpha, \delta_\beta, \delta_\gamma)$. In this case, the allowable deviations in coordinates into larger and smaller may not be equal. For example, when there is a ravine on one side of the target point. In our example, we will assume that the tolerances are equal on both sides. We will define the permissible deviations for all points as $\delta_x = \delta_y = \delta_z = 2, \delta_\alpha = \delta_\beta = \delta_\gamma = 5$.

The robot has a set of sensors $S = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$, where S_1 is an accelerometer (roll), S_2 is an accelerometer (pitch), S_3 is an accelerometer (yaw), S_4 is a range finder that allows you to find out the distance to the nearest object in the direction movement, if it does not exceed 3 conventional units. At the initial moment of time, the actual frequencies of obtaining data from the sensors are the same: $\lambda_1(t) = \lambda_2(t) = \lambda_3(t) = 1$. We also define the maximum allowable frequencies as equal: $\lambda_1^* = \lambda_2^* = \lambda_3^* = 10$.

At the point $p_3 = (x_3 = 5, y_3 = 5, f(x_3, y_3) = 5)$, the center of the obstacle in the form of a circle is located (for example, a stump) with a radius of 1 conventional unit. The robot takes sensor readings once per unit of time. In the process of achieving the goal, the robot tracks the following events: $E = \{E_1, E_2, E_3\}$, where $E_1 = \{e_{1,t,1}\}$ is roll, $E_2 = \{e_{2,t,1}\}$ is pitch, $E_3 = \{e_{3,t,1}, e_{3,t,2}, e_{3,t,3}, e_{3,t,4}\}$ — collision with an obstacle. All events are long-term. For E_1 and E_2 , the name of the event coincides with the characteristic, E_3 is tracked by $e_{3,t,1}$ — roll, $e_{3,t,2}$ — pitch, $e_{3,t,3}$ — yaw, $e_{3,t,4}$ — distance to the object in the direction of motion. Functions for determining the characteristics of an event at time t are defined as follows (4)–(6):

$$f_1(S_t) = |s_{1,t}| = \{e_{1,t,1}\}, \quad (4)$$

$$f_2(S_t) = |s_{2,t}| = \{e_{2,t,1}\}, \quad (5)$$

$$f_3(S_t) = \frac{\max(s_{1,t}, s_{2,t}, s_{3,t}, 1000/s_{4,t})}{100} = \{e_{3,t,1}\}. \quad (6)$$

In this case, the functions $g_i(E_{i,t})$ will coincide with the characteristics of the event:

$$g_1(E_{1,t}) = e_{1,t,1}, \quad g_2(E_{2,t}) = e_{2,t,1}, \quad g_3(E_{3,t}) = e_{3,t,1}.$$

In the process of achieving the goal at each time t , the robot checks to what extent the events are dangerous:

$$E_t^* = \left\{ \left(\omega_{1,t}, \mu_1(\omega_{1,t}) \right), \left(\omega_{2,t}, \mu_2(\omega_{2,t}) \right), \left(\omega_{3,t}, \mu_3(\omega_{3,t}) \right) \right\}.$$

The functions $\mu_i(\omega_{i,t})$ are defined as follows (7)–(9). The functions for determining the frequency of data collection from sensors are defined as (10):

$$\mu_1(\omega_{1,t}) = \begin{cases} 0, & \text{if } \omega_{1,t} \leq 20 \\ 0.5, & \text{if } 20 < \omega_{1,t} \leq 25 \\ 0.75, & \text{if } 25 < \omega_{1,t} \leq 35 \\ 1.0 & \text{else} \end{cases}, \quad (7)$$

$$\mu_2(\omega_{2,t}) = \begin{cases} 0, & \text{if } \omega_{2,t} \leq 10 \\ 0.25, & \text{if } 10 < \omega_{2,t} \leq 20 \\ 0.5, & \text{if } 20 < \omega_{2,t} \leq 25 \\ 0.75, & \text{if } 25 < \omega_{2,t} \leq 35 \\ 1.0 & \text{else} \end{cases}, \quad (8)$$

$$\mu_3(\omega_{3,t}) = \begin{cases} 0, & \text{if } \omega_{3,t} \leq 20 \\ 0.25, & \text{if } 20 < \omega_{3,t} \leq 40 \\ 0.5, & \text{if } 40 < \omega_{3,t} \leq 55 \\ 0.75, & \text{if } 55 < \omega_{3,t} \leq 65 \\ 1.0 & \text{else} \end{cases}, \quad (9)$$

$$\lambda_j(t) = 1 + \max_{i=1,2,\dots,m} [\mu_i(\omega_{i,t}) \cdot 9]. \quad (10)$$

The control module initializes the following multiset of atomic actions A . The elements of multiset A are described in Table 1. After that, the robot proceeds to perform atomic actions.

Table 1

List of elements of multiset A

Index	Atomic actions
1	Move towards point p_1
2	Move towards point p_1
3	Move towards point p_1
4	Check soil around point p_1
5	Check soil around point p_1
6	Plant seedling around point p_1
7	Move towards point p_2
8	Move towards point p_2
9	Move towards point p_2
10	Check soil around point p_2
11	Check soil around point p_2
12	Plant seedling around point p_2
13	Move towards point p_0
14	Move towards point p_0
15	Move towards point p_0
16	Move towards point p_0
17	Move towards point p_0
18	Move towards point p_0

As a result of performing atomic actions from the multiset A , dangerous events occur at times $t = 2$, $t = 16$. To prevent a collision with an obstacle, the robot needs to add such atomic actions as “turn by 45°” and “move forward a distance of 3 conventional units”. These actions must be performed both times when the robot is in danger of colliding with an obstacle. As a result, the multiset of atomic actions will increase by 4 elements and in the final version is described in the Table 2.

The considered example demonstrates the possibility of using an event-based mathematical model for detecting dangerous events, as well as the possibility of extension. In particular, allowable deviations in tree planting coordinates were introduced. What are the advantages of using such a method in comparison with probabilistic and threshold models? We will describe two key benefits.

Table 2

Modified list of elements of multiset A

Index	Atomic actions
1	Move towards point p_1
2	Move towards point p_1
3	Rotate 45°
4	Move forward a distance of 3 conventional units
5	Move towards point p_1
6	Check soil around point p_1
7	Check soil around point p_1
8	Plant seedling around point p_1
9	Move towards point p_2
10	Move towards point p_2
11	Move towards point p_2
12	Check soil around point p_2
13	Check soil around point p_2
14	Plant seedling around point p_2
15	Move towards point p_0
16	Move towards point p_0
17	Move towards point p_0
18	Move towards point p_0
19	Rotate 45°
20	Move forward a distance of 3 conventional units
21	Move towards point p_0
22	Move towards point p_0

1. False positives cases. Both probabilistic and threshold models can have a high rate of false positives, where events are incorrectly identified as dangerous. This can lead to unnecessary alarms or interventions, wasting resources and causing inconvenience. In the method with fuzzy sets, the reaction force depends on the level of occurrence of the event, which reduces the possible damage from false positives. If in the example above there were more densely spaced obstacles, then the AMR simply went between them and always detected the occurrence of dangerous events.

2. Limited applicability: probabilistic and threshold models may not be suitable for all types of dangerous events. They often make assumptions about the distribution or nature of the events being monitored, which may not hold true in certain scenarios. It can limit their effectiveness and reliability in detecting a wide range of dangerous events. At the same time, a model built on fuzzy sets makes it possible to overcome this limitation. In the example above, the threshold or probabilistic model cannot have had time to adapt to a small amount of roll with a high growth rate.

Conclusion

The article describes a mathematical modeling method for event-based mathematical models that makes it possible to detect the occurrence of dangerous events. The described method differs from those already used in determining the occurrence of an event. For this, functions are proposed that allow evaluating the occurrence of events that are fuzzy in nature.

The occurrence of dangerous events is detected according to the readings of the sensors at each moment of time. The set of dangerous events is predetermined but the exact characteristics of the occurrence of the event are unknown. Each event corresponds to a certain set of sensors, the data from which makes it possible to determine the characteristics of the event. The obtained characteristics are transferred as parameters of the fuzzy set membership function and the level of occurrence of a dangerous event is calculated. An example of using an event-based mathematical model is also given (4)–(10). In addition, the appendix to the article contains dangerous events that may occur during the operation of the forest robot in Table 3.

The developed method has many applications. For example it can be used for the formation of elements of a “smart bionic internet environment” for a person. The operator involved in the remote control receives amplification of the senses using a human-machine interface.

References

1. **Alatise M. B., Hancke G. P.** A Review on Challenges of Autonomous Mobile Robot and Sensor Fusion Methods, *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 39830–39846.
2. **Rubio F., Valero F., Llopis-Albert C.** A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical frame work, and applications, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2019, vol. 16, no. 2, article 1729881419839596. DOI: 10.1177/1729881419839596.
3. **Moshayedi A. J., Shuvam Roy A., Sambo S. K.** et al. Review On: The Service Robot Mathematical Model, *EAI Endorsed Trans AI Robotics*, 2022, vol. 1, no. 1, p. e8. DOI: 10.4108/airo.v1i.20.
4. **Tzafestas S. G.** Mobile Robot Control and Navigation: A Global Overview, *J Intell Robot Syst.*, 2018, vol. 91, no. 1, pp. 35–58. DOI: 10.1007/s10846-018-0805-9.
5. **Ning H., Lipeng Q., Ruoxia L., Yuesheng L.** Design of a Model Predictive Trajectory Tracking Controller for Mobile Robot Based on the Event-Triggering Mechanism, *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, vol. 2021, article ID 5573467. DOI: 10.1155/2021/5573467.
6. **Liang X., Xiao Y., Zhang J.** et al. Stochastic event capturing with a single mobile robot in rectangular perimeters. *Telecommun. Syst.*, 2013, vol. 52, no. 4, pp. 2519–2532. DOI: 10.1007/s11235-011-9570-9.
7. **Antonelli G., Chiaverini S., Fusco G.** A Fuzzy-Logic-Based Approach for Mobile Robot Path Tracking, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2007, vol. 15, no. 2, pp. 211–221. DOI: 10.1109/TFUZZ.2006.879998.
8. **Ngangbam H. S., Khelchandra T.** Mobile Robot Navigation Using Fuzzy Logic in Static Environments, *Procedia Computer Science*, 2018, vol. 125, pp. 11–17. DOI: 10.1016/j.procs.2017.12.004.
9. **Aguirre E., Gonzalez A.** Fuzzy behaviors for mobile robot navigation: Design, coordination and fusion, *Int. J. Approx. Reas.*, 2000, vol. 25, pp. 255–289.
10. **Rego G. E., Korzun D. G., Shchegoleva L. V.** Forest Robot Project: A conceptual model for motion analysis of a mobile robotic system for reforestation and thinning, *Prospects and opportunities for the use of digital technologies in science, education and management, Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference*, Astrakhan, 2022, pp. 206–210 (in Russian).
11. **Galaktionov O. N., Rego G. E., Tomskih M. G., Zavyalov S. A., Korzun D. G.** On the design of a wheeled chassis and a sensor system for autonomous movement on difficult terrain with overcoming and bypassing obstacles when performing forestry work (article), *CRDI RTC*, Saint Petersburg, 2022, pp. 35–46 (in Russian).
12. **Galaktionov O., Zavyalov S., Shchegoleva L., Korzun D.** Features of Building a Forestry Intelligent Robotic System, *Conference of Open Innovations Association*, FRUCT, 2021, no. 29, pp. 433–436.
13. **Korzun D. G.** About the digital assistant for monitoring human resilience in everyday life, *Big data and problems of society. Collection of articles on the results of the International Scientific Conference*, Kirov, 2022, Tomsk, Publishing house of the Tomsk state University, 2022, pp. 86–89 (in Russian).
14. **Bazhenov N., Korzun D.** Event-Driven Video Services for Monitoring in Edge-Centric Internet of Things Environments. *25th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, Helsinki, Finland, 2019, pp. 47–56, DOI: 10.23919/FRUCT48121.2019.8981505.
15. **Anh T. N. B., Tan S.-L.** Real-Time Operating Systems for Small Microcontrollers. *IEEE Micro*, 2009, vol. 29, no. 5, pp. 30–45. DOI: 10.1109/MM.2009.86.
16. **Rego G. E., Bazhenov N. A., Rybin E. I.** Substantiation of equipment for a forest robot in relation to the scientific and production tasks to be solved, *Robotics and artificial intelligence: materials of*

the XIV All-Russian scientific and technical conference with international participation, Zheleznogorsk, 26.11.2022, Krasnoyarsk, 2022, pp. 49–57 (in Russian).

Appendix

One of the applications of the proposed method is the detection of dangerous events associated with mobile robots. We will describe a set of dangerous events that may occur in the process of reaching the goal by the forest robot. Events, nature of events, sensors to track, recommended frequency of data acquisition from sensors, and expected control action are described in Table 3.

This list does not claim to be complete. The purpose of this table is to provide researchers with a first approximation of possible problems. The contents of the table can be either supplemented or truncated, depending on the contest of the task, the operating conditions of the AMR, as well as its specific configuration. In the future, it is planned to test this method on a real robot designed for planting trees and performing forestry work. The purpose of such approbation is to test the proposed method for applicability in real conditions, as well as to determine specific numerical parameters.

It is worth explaining some points in the table. For example, damage to sensors is proposed to be detected using sensors that perform a similar function. An example is the implementation of tracking the trajectory of movement. We will assume the IMUs are broken. If the AMR moves, the images from the video cameras will change, and the readings of the IMU sensors will not correspond to these changes.

The starting point in the table is the place from which the robot started to perform the movement. It is assumed that at such a point there is an operator who can deal with malfunctions, refuel the robot, etc. There may be several such points. For example, a robot can start at one end of a cutting area and finish at the opposite end. The starting point to which the robot returns due to the occurrence of a dangerous event is chosen arbitrarily, based on the current situation in this case.

The AMR falling into a quagmire is one of dangerous events. The mechanism of occurrence of the quagmire is as follows. At the time of felling, the lowland was dry, then it began to rain, as a result of which a quagmire formed. In this case, the dangerous event is more predictable than the others. The possibility of this dangerous event occurring can be foreseen by the operator at the stage of preparing the AMR for operation in a certain cutting area.

List of dangerous events

Event E_i	Event type (discrete, long-term, compound)	Event tracking sensors S	Recommended tracking frequency $\lambda_j(t)$	Control action in the event of an event
Dangerous roll (or pitch)	Long-term	Inertial measurement unit (IMU)	1 to 10 times per second	Changing the trajectory of movement
Wheel damage due to collision with an obstacle	Compound	IMU, tire pressure sensor	Once every few seconds	Return to starting point if possible
Sensor damage	Long-term	Self-diagnosis, or sensors that perform similar functions	Depends on the current frequency of use of the sensor	Use of replacement sensors (functional redundancy) and, if possible, return to the starting point. Otherwise, a request for help from the operator
Loss of communication with the local control station	Long-term	Communication means (radio, wi-fi, etc.)	Once every few seconds	Variably. Both the continuation of the work and the return to the starting point are possible
Fuel leak	Long-term	Fuel level sensor	Once a minute	Return to starting point
Critical fuel level	Long-term	Fuel level sensor	Once a minute	Return to starting point
Collision with an obstacle due to incorrect estimation of its parameters	Compound	IMU	As robot goes through obstacles	Reverse if the obstacle is not overcome. Continuation of the movement if the obstacle was overcome.
Leaving the scene due to incorrect estimation of its parameters (robot disorientation)	Compound	IMU, video cameras	Once every few seconds	Stop motion. Request for help from the operator
False obstacle recognition (for example, leaves were recognized as a tree)	Discrete (can be long-term)	Force sensor	As obstacles are detected	Driving through a recognized obstacle
The occurrence of unsuitable operating conditions in the operation of the robot	Long-term or compound	All sensors possible (depending on operating parameter)	Depends on specific operating conditions	Stop motion. Request for help from the operator
The occurrence of a shortage of computing resources due to overheating (engine fire, rapidly spreading forest fire)	Compound	Temperature sensor	Once every few seconds	Temporary stoppage. If the problem is not solved, a request for help from the operator is sent
AMR falling into the swamp	Discrete	IMU	Once every few seconds	Request for operator assistance
Lightning strike (requires grounding)	Discrete	Lightning Strike Recorder	During a thunderstorm	Carrying out self-diagnosis
Vandalism (deliberate damage, Luddites)	Long-term	Video cameras	Once a minute	Operator assistance request (police call)
Aggressive behavior of animals (elk, wild boar, bear)	Long-term	Video cameras	Once a minute	Request for operator assistance
Falling tree on the robot (influenced by wind)	Discrete	IMU	Once a minute	Carrying out self-diagnosis
Image distortion (sun, wind, fluctuations)	Long-term	Video cameras, IMU (if there is vibration)	Depends on the frequency of data arrival	Exclusion of distorted data from the number of analyzed
Failure of positioning systems	Discrete	Self-diagnosis of positioning systems	Once every few seconds	Return to starting point if possible
Failure of an individual module or sensor	Depends on the type of failure	Depends on the type of failure	Depends on the nature of the failure	Ensuring functional redundancy at the stage of preparing the AMR for operation
Random hardware failure	Depends on the type of failure	Depends on the type of failure	Once every few seconds	Carrying out self-diagnosis

А. М. Стебеньков, канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры, stebenkov@inbox.ru,
А. И. Сунагатуллина, студент, adelinasun@list.ru,
Волгоградский государственный медицинский университет

Экспертная система диагностики посттравматического стрессового расстройства

*Поступила в редакцию 13.06.2023
Принята к публикации 04.07.2023*

Посредством анализа результатов исследований в области диагностики посттравматического стрессового расстройства выявлены необходимые критерии, а также тестовые методики и шкалы, использованные на данном направлении. Рассмотрены проблемные вопросы диагностики, которые на настоящее время существуют в России. Представлен разработанный авторами алгоритм экспертной системы диагностики посттравматического стрессового расстройства в виде консольного приложения. Такой алгоритм способен частично заменить специалистов в данной области и помочь усовершенствовать и ускорить первичную диагностику расстройства. Представлена работа алгоритма и подтверждение его работоспособности.

Ключевые слова: диагностика, посттравматическое стрессовое расстройство, МКБ-10, SCL-90, Миссисипская шкала, экспертная система, алгоритм

Для цитирования:

Стебеньков А. М., Сунагатуллина А. И. Экспертная система диагностики посттравматического стрессового расстройства // Программная инженерия. 2023. Том 14, № 9. С. 452—459. DOI: 10.17587/prin.14.452-459.

Введение

Современное общество все чаще встречается с тяжелыми и стрессовыми ситуациями, связанными с политическими, террористическими, военными и психотравмирующими событиями, которые вводят людей в стрессовое состояние. Данные события могут быть причиной возникновения посттравматического стрессового расстройства (ПТСР). Высокая вероятность развития ПТСР в современном мире обуславливает актуальность разработки и внедрения мероприятий, направленных на диагностику данного расстройства, коррекцию возникших психологических изменений человека.

Посттравматическое расстройство — это одна из актуальных проблем современного мира. Риск развития ПТСР возрастает с увеличением количества пережитых травматических ситуаций. Несвоевременная диагностика расстройства ведет к развитию симптомов, ухудшению состояния пациента. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения (2019 г.), у одного из каждых

11 человек (9 %), переживших войну или другие травматические ситуации, в следующие десять лет возникнет психическое расстройство в средней или тяжелой степени. Частота вновь выявленных случаев развития ПТСР среди населения составляет 0,37 %. Эпидемиологические исследования доказали, что на протяжении жизни 1 % населения подвергнется ПТСР после тяжелых психических травм, у 15 % будут возникать отдельные симптомы расстройства.

Возникновение COVID-19 не только привело к множеству смертей среди населения мира, но также нанесло психическую травму пациентам, перенесших данный вирус в тяжелой форме. Из статьи Д. В. Назарова и В. В. Блинниковой были рассмотрены результаты по числу людей, у которых было выявлено ПТСР [1]. Исследования показали, что из 53 человек у 64,2 % было выявлено данное расстройство. Следовательно, статистика ПТСР в России во времена пандемии выросла. Но мало кто из людей понимает, насколько велика эта проблема. ПТСР может возникнуть в течение 3 месяцев, и не каждый человек поймет, что ему необходима помощь.

1. Теоретические аспекты посттравматического стрессового расстройства

В настоящем разделе представлены основные причины возникновения и развития ПТСР. Даны краткие описания симптоматики и признаков расстройства, основанные на критериях МКБ-10 (Международная классификация болезней десятого пересмотра).

1.1. Причины возникновения посттравматического стрессового расстройства

Посттравматическое стрессовое расстройство — это серьезное психическое расстройство, которое возникает как следствие пережитого стресса.

Посттравматическое стрессовое расстройство — это психиатрическое состояние, которое может происходить у любого, кто пережил опасное для жизни или насильственное событие. Травмы могут быть вызваны войной, терроризмом, пытками, стихийными бедствиями, несчастными случаями, насилием и изнасилованием.

Из четырех категорий симптомов, связанных с посттравматическим стрессовым расстройством, — навязчивые воспоминания, избегание и онемение, а также гипервозбуждение — избегание и онемение кажутся наиболее специфичными для выявления ПТСР [2].

Посттравматическое стрессовое расстройство когда-то было связано исключительно с военной службой, оно характеризуется терминами «снаряд-шок» и «боевая усталость». Однако сейчас признается, что ПТСР может возникать в любой травматической ситуации и может поражать как взрослых, так и детей.

У людей с ПТСР есть воспоминания о событии, которые они снова и снова переживают (т. е. флешбэки, кошмары) [3]. Они избегают людей и мест, связанных с травмой, их пугают звуки или визуальные изображения, которые преследовали их в стрессовой ситуации. У таких людей наблюдаются нарушения со сном и концентрацией.

Посттравматическое стрессовое расстройство возникает в ответ на действие психотравмирующего фактора и характеризуется нарушением нормальной работы психики.

Существует следующие далее два типа травмирующих событий:

- 1) краткосрочное, неожиданное травматическое событие;
- 2) постоянное и повторяющееся воздействие травматического стрессора — серийная травматизация.

К первому типу можно отнести такие события, как ДТП, сексуальное насилие, естественные катастрофы, стрельбу [4]. Эти события характеризуются единичным воздействием, они являются изолированными и наносят редкие травматические переживания, при которых с большей степенью вероятности проявляется классическое повторное переживание травматического опыта.

Ко второму типу относят повторяющееся физическое или сексуальное насилие (жестокое обращение), боевые действия. Такая травма сначала переживается как по первому типу, но впоследствии жертва переживает повторения травмы. Здесь высокая вероятность возникновения долгосрочных проблем личностного характера. Для воспоминаний такого рода событий характерна их неоднородность и неясность. Человек переживает чувство беспомощности в предотвращении травмы.

Часто одно единственное стрессовое событие не вызывает большинство симптомов ПТСР, чтобы соответствовать его критериям, но события насильственного характера, убийства, война и терроризм вызывают сразу множество симптомов, связанных с ПТСР. Таким образом, причинами ПТСР являются экстремальные ситуации, в которых оказался человек.

К травмирующим событиям относят: природные и техногенные катастрофы, военные действия, террористические акты, насилие и пытки, сексуальное насилие, несчастные случаи, события, связанные со смертью близкого человека, хирургические операции, длительные заболевания, прием алкогольных и психотропных веществ, события, когда человек был вынужден причинять вред другому человеку, отравления.

Существуют определенные особенности травматических ситуаций, от которых зависят многие факторы расстройства. К ним относятся: длительность, внезапность, периодичность, унижение личного достоинства, паника, т. е. невозможность сохранения контроля, вторжение в личное пространство (сексуальное насилие). Травма может быть более тяжелой для некоторых, если это связано с ребенком.

1.2. Диагностические критерии МКБ-10

Международная классификация болезней, связанных со здоровьем (МКБ-10), классифицирует ПТСР как «реакцию на тяжелый стресс и нарушения адаптации» [5].

Критерии ПТСР в МКБ-10 включают в себя перечисленные далее признаки.

1. Человек должен подвергаться необычайно угрожающим и катастрофически стрессовым си-

туациям или событиям, которые могут вызвать дистресс практически у любого индивида.

2. Стойкие воспоминания или «воскрешение» стрессора во время навязчивых воспоминаний, флешбэков, повторного переживания горя.

3. Человек демонстрирует избегание или стремление избежать людей, мест, объектов или упоминаний о травмирующем событии.

4. Наблюдается психогенная амнезия, либо частичная, либо полная в отношении важных моментов травматического события.

5. Человеку присущи раздраженность, вспышки гнева.

6. Наблюдаются затруднения с концентрацией внимания.

7. Проблемы со сном.

8. Повышенный уровень бодрствования.

Случаи, когда состояние пациента соответствовало всем критериям ПТСР, перечисленными в МКБ-10, довольно редки.

2. Алгоритм работы экспертной системы

На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма диагностики ПТСР.

Сначала пациент вводит свои данные, такие как фамилия, имя, отчество, дата рождения и дата приема. Запись осуществляется как структура. Если пациент сделал ошибку при вводе, ему предоставляется возможность отредактировать данные.

На этом этапе начинается тестирование по Миссисипской шкале. Это клиническая тестовая методика, разработанная для диагностики ПТСР. В данном опроснике выясняется, связаны ли проблемные вопросы пациента с наличием у него опыта участия в боевых действиях или они связаны с другими причинами гражданского характера. Далее идет вычисление итогового значения шкалы (MS), границей является число 100. Если итоговая оценка больше этого значения, значит травматическое событие имеет сильное влияние на человека. Результат записывается в итоговый файл, который хранит все результаты тестирования и рекомендации. Если травматическое событие не влияет на пациента, то он может закончить тестирование. Однако, если у него появится желание узнать симптоматику состояния, то ему предоставляется возможность продолжить процедуру диагностирования.

Пациент, у которого подтверждено влияние травматического события, в любом случае проходит симптоматический опросник SCL-90, состоящий из 90 утверждений. Это клиническая тестовая и скрининговая методика. По ответам

пациента по данной шкале экспертная система оценивает следующие симптомы: соматизация (проявление психического расстройства в виде физических симптомов); обсессивно-компульсивное расстройство (состояние, которое характеризуется навязчивыми идеями и компульсиями); сензитивность (характерологическая способность человека, способность его ощущать, различать и реагировать на внешние раздражители); депрессия (нарушение психического здоровья, при котором человек ощущает подавленность и теряет интерес к привычной деятельности); тревожность (склонность человека к частым переживаниям); враждебность (состояние человека, при котором он агрессивно и гневно относится к окружающим вещам и людям); фобия (симптом, сутью которого является иррациональный неконтролируемый страх); паранойя (психическое отклонение, сопровождающееся постоянной тревожностью, безумными идеями) и психотизм (ассоциативное поведение человека). Для каждого симптома инициализируется массив вопросов, ответы на которые обрабатываются посредством представленных далее функций.

Если по симптоматическому опроснику результаты таких симптомов, как депрессия, ОКР (обсессивно-компульсивное расстройство) или тревожность были больше, чем граничное значение 2,48, то пациент проходит дополнительные тесты на их выраженность. В данном случае это шкала депрессии Бэка, шкала Йеля-Брауна, разработанная Вейном Гудманом и его коллегами в Йельском и Брауновском университетах, и шкала тревоги Бэка.

По шкале депрессии Бека можно определить степень выраженности депрессии у пациента. Это тест, который содержит в себе 21 категорию симптомов и жалоб по данному симптому.

Шкала Йеля-Брауна — это тестовая методика, позволяющая оценить степень выраженности ОКР, т. е. имеет ли человек навязчивые мысли, которые могут привести к компульсивным действиям.

Шкала тревожности Бека — это опросник, позволяющий предварительно оценить степень выраженности тревожных расстройств.

Итоги всех тестовых методик фиксируются в текстовом файле, там же добавлены данные пациента.

В файл результатов записываются также рекомендации, которые строятся на анализе значений некоторых из шкал. Например, общей рекомендацией является анализ крови, электрокардиография (ЭКГ). Если же обнаружены проблемы с аппетитом и повышена соматизация, то будет рекомендовано обратиться к гастроэнтерологу,

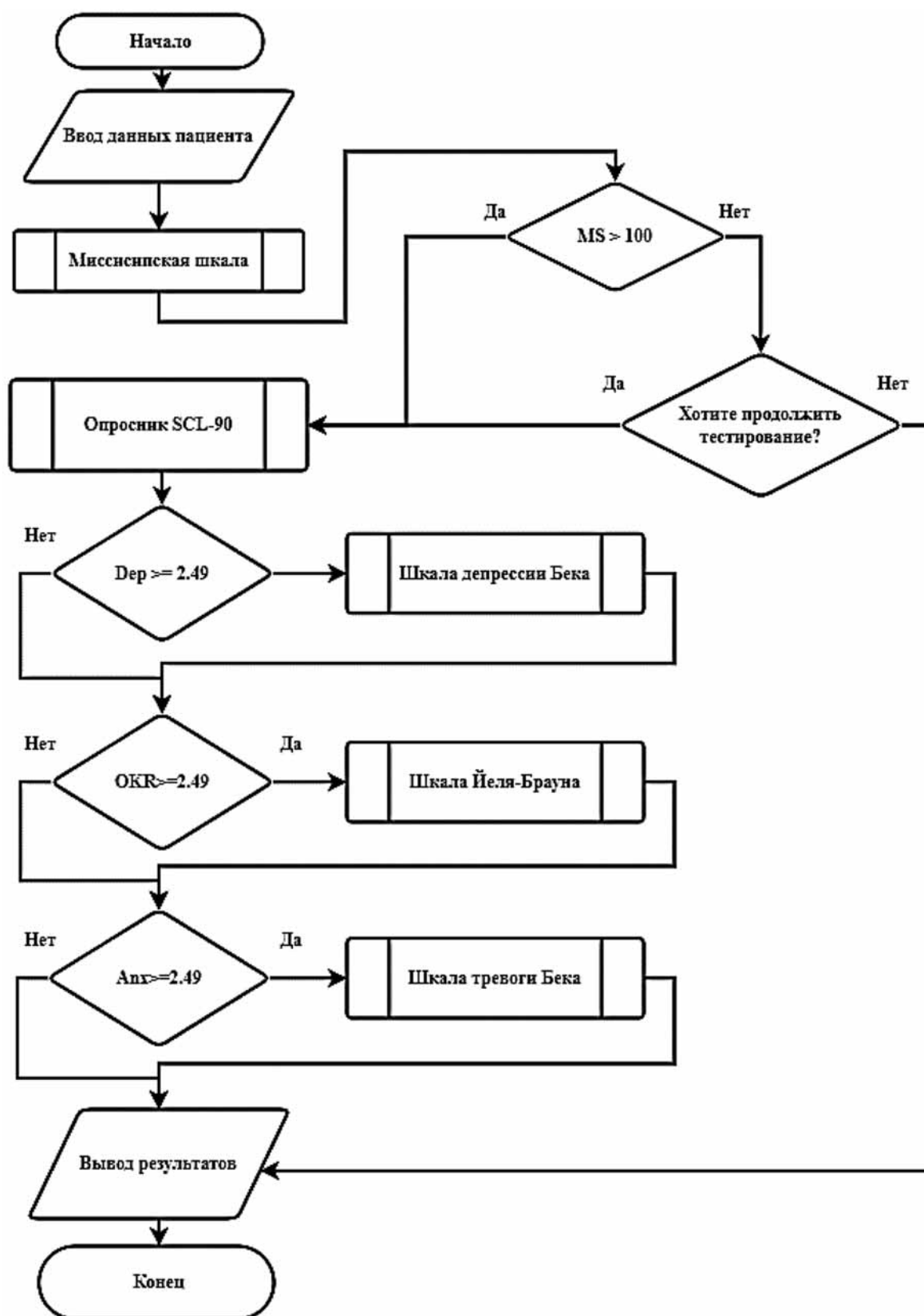


Рис. 1. Блок-схема алгоритма экспертной системы:

Dep — переменная, которая хранит результат по симптому депрессии; OKR — переменная, которая хранит результат по симптому обсессивно-компульсивного расстройства; Anx — переменная, которая хранит результат по симптому тревожности

так как из-за стресса часто страдает желудочно-кишечный тракт.

В процессе тестирования пациенту будет задан контрольный вопрос «Введите дату приема». Он используется для того, чтобы проверить, насколько внимательно проходит тест человек и не пытается ли он симулировать симптоматику.

По итогам работы экспертной системы в представленном далее виде формируется конечный файл, включающий:

- 1) данные пациента (ФИО, дата рождения, дата приема);
- 2) результаты Миссисипской шкалы (подтверждение наличия пережитой травматической ситуации);
- 3) результаты симптоматического опросника SCL-90 (наличие или отсутствие симптомов, сопровождающих ПТСР);
- 4) результаты по дополнительным шкалам (выраженность отдельных немаловажных симптомов);
- 5) рекомендации пациенту на основе из выявленных у него симптомов.

Так как на настоящем этапе разработки создается только алгоритм и начальная версия экспертной системы, то она имеет примитивный вид в виде консольного приложения. Для улучшения ее работы на следующих этапах планируется использовать вместо данных пациента «индивидуальный код». Такой код будет записан в карте пациента в поликлинике, чтобы обезопасить результаты диагностики и самого пациента от кражи конфиденциальной информации.

3. Программная часть экспертной системы

Запись данных пациента идет в структуру, представленную на рис. 2. Код написан на языке C++, в структуре хранятся такие данные, как фамилия (lastname), имя (firstname), отчество (patronymic), дата рождения (day) и дата приема (date_of_appointment).

В основную функцию main () включены Миссисипская шкала и симптоматический опросник SCL-90, ответы пациента на тестовые методики записываются в массивы целочисленного и вещественного типов данных. Посредством функций они обрабатываются, т. е. идет суммирование элементов массивов, что и является результатом теста, который далее сравнивается с граничным значением опросника.

Дополнительные тестирования включены в отдельную библиотеку, так как они не

```
struct Patient //Запись данных пациента
{
    string lastname;
    string firstname;
    string patronymic;
    string day;
    string date_of_appointment;
} num1;
```

Рис. 2. Данные пациента в виде структуры

являются обязательными и используются только в том случае, если у пациента имеется определенный симптом, описанный ранее.

Рассмотрим функции, которые используются для Миссисипской шкалы. На рис. 3 представлен код функции, которая меняет значения массива по Миссисипской шкале, это необходимо, чтобы пациент при прохождении тестирования не смог обмануть экспертную систему и дать ей ложную информацию по своему здоровью.

На рис. 4 представлена функция суммирования элементов массива посредством оператора цикла с параметром for.

Таким образом, можно сказать, что код экспертной системы не требует излишних и сложных выражений и функций, но тем не менее такая экспертная система поможет в будущем облегчить диагностику ПТСР и будет способна отчасти заменить специалиста в данной области.

```
void Inverse_values(int x[], int i) // изменить обратные значения
{
    if (x[i] == 1)
    {
        x[i] = 5;
    }
    else if (x[i] == 2)
    {
        x[i] = 4;
    }
    else if (x[i] == 3)
    {
        x[i] = 3;
    }
    else if (x[i] == 4)
    {
        x[i] = 2;
    }
    else if (x[i] == 5)
    {
        x[i] = 1;
    }
}
```

Рис. 3. Функция обработки массива для Миссисипской шкалы

```

float MS_sum(int y[], int n) // подсчет результата
{
    float sum = 0;
    for (int i = 0; i < n; i++)
    {
        sum += y[i];
    }
    return sum;
}

```

Рис. 4. Функция суммирования элементов массива

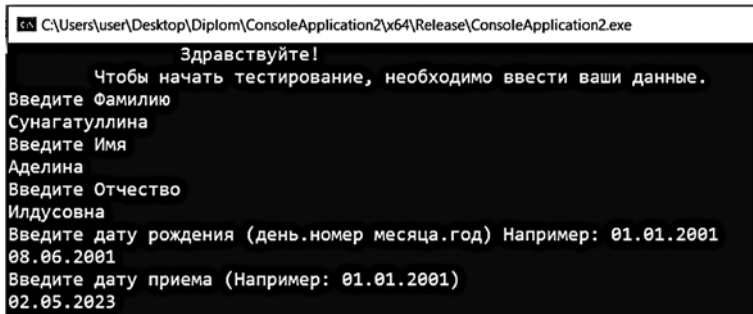


Рис. 5. Использование экспертной системы

4. Выводы по работе экспертной системы

Как отмечалось ранее, на начальном этапе идет запись данных пациента. В консольном варианте это выглядит так, как показано на рис. 5.

Пройдя опрос, результаты экспертной системы получаем в виде текстового документа (рис. 6).

Проверим работоспособность системы. Проверку будем проводить при максимальных значениях для шкалы соматизации. Отмечаем также

Пациент: Сунагатуллина Аделина Илдусовна
 Дата рождения: 08.06.2001
 Дата приема: 02.05.2023

Результаты по Миссисипской шкале: 152
 итоговый балл превысил норму. Травматическое событие имеет выраженное влияние на пациента (не связано с боевым опытом).

Соматизация (повышена) = 2.91667
 Нарушения, называемые соматизацией, отражают дистресс, возникающий из-за ощущения телесной дисфункции ССС (сердечно-сосудистая система), ЖКТ, дыхательной системы, а также при головных болях, дискомфорта общей мускулатуры.
 Рекомендации: Выявлены нарушения аппетита. Следует обратиться к гастроэнтерологу. Также необходимо сдать анализ крови и мочи и пройти ЭКГ.

Обсессивность-компульсивность(повышена) = 3.2
 Расстройство отражает симптомы, которые в сильной степени тождественны стандартному клиническому синдрому с тем же названием. Эти вопросы касаются мыслей, импульсов и действий, которые переживаются индивидом как непрерывные

Межличностная сензитивность(повышена) = 2.77778
 Данное расстройство определяется чувствами личностной неполноценности и неадекватности. Самоосуждение, чувство беспокойства и заметный дискомфорт.

Депрессия = 2.46154 НОРМА

Тревожность = 2.3 НОРМА

Враждебность = 1.83333 НОРМА

Фобия = 2.14286 НОРМА

Паранойяльность (повышена) = 3.16667
 Данное определение представляет паранойяльное поведение как вид нарушений мышления.
 Кардинальные характеристики проективных мыслей, враждебности, подозрительности, напыщенности, страха потери независимости.

Психотизм = 2 НОРМА

Дополнительные вопросы:
 Плохой аппетит - 3
 Проблемы с засыпанием - 2
 Мысли о смерти - 2
 Переедание - 4
 Бессоница по утрам - 3
 Беспокойный и тревожный сон - 3
 Чувство вины - 1

Общий индекс тяжести симптомов - 2.55556
 Индикатор текущего состояния и глубины расстройства.
 Это информация о количестве симптомов и интенсивности переживаемого дистресса.Это общий индекс тяжести.

Широта диапазона симптоматики - 89

Измерение интенсивности дистресса - 2.58427

Итоговое значение шкалы Йеля-Брауна (ОКР) = 25
 ОКР тяжелой степени.

Рекомендации: Так как выявлены симптомы ПТСР, Вам необходимо посетить психиатра, передав ему данный отчет.
 Для исключения соматической патологии и оценки рисков развития побочных эффектов рекомендуется сделать общий анализ крови; биохимический анализ крови; общий анализ мочи; определение уровня гормонов. Направление на анализы вы должны подтвердить у терапевта.

Рис. 6. Результаты первичного диагноза от экспертной системы

Пациент: Сунагатуллина Аделина Илдусовна
Дата рождения: 08.06.2001
Дата приема: 02.05.2023

Результаты по Миссисипской шкале: 152
Итоговый балл превысил норму. Травматическое событие имеет выраженное влияние на пациента (не связано с боевым опытом).

Соматизация (повышена) = 2.91667
Нарушения, называемые соматизацией, отражают дистресс, возникающий из-за ощущения телесной дисфункции ССС (сердечно-сосудистая система), ЖКТ, дыхательной системы, а также при головных болях, дискомфорта общей мускулатуры.
Рекомендации: Выявлены нарушения аппетита. Следует обратиться к гастроэнтерологу. Также необходимо сдать анализ крови и мочи и пройти ЭКГ.

Обсессивность-компульсивность(повышена) = 3.2
Расстройство отражает симптомы, которые в сильной степени тождественны стандартному клиническому синдрому с тем же названием. Эти вопросы касаются мыслей, импульсов и действий, которые переживаются индивидом как непрерывные

Рис. 7. Результат проверки системы при заданных значениях

в дополнительной шкале, что имеются проблемы с аппетитом [6].

По итогу результатом должно быть то, что система выдает рекомендации о посещении терапевта и гастроэнтеролога, а также прохождении ЭКГ и сдачи общих анализов.

После прохождения теста с заданными необходимыми входными значениями, был получен результат, удовлетворяющий ожиданиям, т. е. система дает необходимые рекомендации (рис. 7).

Судить об эффективности экспертной системы можно из опросников и шкал, которые в ней используются. Все они обладают достаточно высокой валидностью, т. е. являются пригодными для использования в диагностике ПТСР.

Также об эффективности свидетельствует тот факт, что в экспертной системе используются несколько опросников и тестов, что как раз и отличает систему от обычных интернет-тестирований. По результатам тестирования она способна выдавать рекомендации, выделенные из методических и клинических рекомендаций «Организация оказания медицинской помощи людям с посттравматическим расстройством».

Заключение

По результатам приведенных исследований можно сделать вывод, что автоматизация в области диагностики психических заболеваний возможна и может быть полезна как для врача, так и для пациентов.

Создание эффективных систем диагностики ПТСР не только актуально для России, но и востребовано в мире. Создание таких экспертных систем позволит облегчить работу специалистов в области диагностики, будет способствовать тому, что первичную диагностику можно будет проводить массово. При необходимости с их помощью можно будет контролировать состояние людей,

сталкивавшихся и переживших травматические и стрессовые ситуации в жизни, которые впоследствии нанесли существенный ущерб их здоровью.

На первом этапе исследования необходимо было выяснить, возможно ли создание именно алгоритма такой экспертной системы с перечисленными выше тестовыми методиками. Об эффективности можно судить по выбранным опросникам, которые имеют высокую валидность, т. е. насколько они пригодны для данной диагностики.

В дальнейшем исследовании будет создан пользовательский интерфейс, а также экспериментальные тестирования на контрольной группе пациентов, в которую будут входить как люди с уже подтвержденным посттравматическим стрессовым расстройством, так и те, кто подверглись стрессовым ситуациям.

Список литературы

1. Назаров Д. В., Блиникова В. В. Частота встречаемости посттравматического стрессового расстройства у пациентов, переболевших коронавирусом в тяжелой форме: статья // Материалы Межрег. науч.-практ. конф. «Молодые ученые — здравоохранению», Саратов, 26—29 апреля 2022 г. URL: <https://medconfer.com/node/19720> (дата обращения 12.06.2023).
2. Посттравматическое стрессовое расстройство / под ред. В. А. Солдаткина, ГБОУ ВПО РостГМУ Минздрава России. Ростов н/Д: Изд-во РостГМУ, 2015. 624 с.
3. Бонкало Т. И. Посттравматическое стрессовое расстройство: дайджест. М.: ГБУ «НИИОЗММ ДЗМ», 2023. URL: <https://niioz.ru/moskovskaya-meditsina/izdaniya-nii/daydzhestmeditsinskiy-turizm-i-eksport-meditsinskikh-uslug/> (дата обращения 12.06.2023).
4. Сидоров П. И., Мосягин И. Г., Маруняк С. В. Психология катастроф: уч. пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению и специальности «Психология» /под ред. П. И. Сидорова. М.: Аспект Пресс, 2008. 414 с.
5. МКБ-10 — Международная классификация болезней 10-го пересмотра. URL: <https://mkb-10.com/index.php?pid = 4257> (дата обращения 12.06.2023).
6. Psylab.info — энциклопедии психодиагностики. URL: https://psylab.info/Симптоматический_опросник/Бланк (дата обращения 12.06.2023).

Expert System for Diagnosing Post-Traumatic Stress Disorder

A. M. Stebenkov, Associate Professor, stebenkov@inbox.ru, **A. I. Sunagatullina**, Student, adelinasun@list.ru, Volgograd State Medical University, Volgograd, 400131, Russian Federation

Corresponding author:

Adelina I. Sunagatullina, Student,
Volgograd, 400131, Russian Federation
E-mail: adelinasun@list.ru

Received on June 13, 2023

Accepted on July 04, 2023

By analyzing the results of research in the field of diagnosing post-traumatic stress disorder, the necessary criteria were identified, as well as test methods and scales used in this direction. This article discusses the problematic issues of diagnostics that currently exist in Russia. The algorithm of the expert system for diagnosing post-traumatic disorder developed by the authors is presented in the form of a console application. Such an algorithm can partially replace specialists in this field and help improve and speed up the primary diagnosis of the disorder. The operation of the algorithm and confirmation of its efficiency are presented.

Keywords: diagnostics, post-traumatic stress disorder (PTSD), ICD-10, SCL-90, Mississippi scale, expert system, algorithm

For citation:

Stebenkov A. M., Sunagatullina A. I. Expert System for Diagnosing Post-Traumatic Stress Disorder, *Programmnyaya Inzheneriya*, 2023, vol. 14, no. 9, pp. 452–459. DOI: 10.17587/prin.14.452-459.

References

1. **Nazarov D. V., Blinnikova V. V.** The incidence of post-traumatic stress disorder in patients who have recovered from severe coronavirus, *materials of Interregional scientific-practical conf. "Young scientists for healthcare"*, Saratov, April 26–29, 2022, available at: <https://medconfer.com/node/19720> (in Russian) (date of access 12.06.2023).

2. **Post-traumatic stress disorder** / ed. V. A. Soldatkin; GBOU VPO RostGMU of the Ministry of Health of Russia. Rostov n/D: RostGMU Publishing House, 2015, 624 p. (in Russian).

3. **Boncalo T. I.** Post-traumatic stress disorder: digest. Electron. text data. Moscow, GBU "NIIOZMM DZM", 2023, available at:

<https://niiroz.ru/moskovskaya-meditsina/izdaniya-nii/daydzhest-meditsinskiy-turizm-i-eksport-meditsinskikh-uslug/> (in Russian) (date of access 12.06.2023).

4. **Sidorov P. I., Mosyagin I. G., Marunyak S. V.** Psychology of catastrophes: a textbook for students of higher educational institutions studying in the direction and specialty "Psychology" / ed. P. I. Sidorov. Moscow, Aspect Press, 2008. 414 p. (in Russian).

5. **ICD-10** — International Classification of Diseases of the 10th revision, available at: <https://mkb-10.com/index.php?pid=4257> (date of access 12.06.2023).

6. **Psylab.info** — encyclopedias of psychodiagnostics, available at: https://psylab.info/Symptomatic_questionnaire/Form (in Russian). (date of access 12.06.2023).

Я. А. Туровский^{1,2}, д-р техн. наук, канд. мед. наук, доц., Yaroslav_turovsk@mail.ru,
В. Ю. Алексеев², аспирант, quindecim413@mail.ru,
С. В. Борзунов², канд. физ.-мат. наук, доц., sborzunov@gmail.com,
¹ Институт проблем управления РАН им. В. А. Трапезникова, Москва,
² ФГБОУ ВО Воронежский государственный университет

Информационная система оценки подготовки оператора к условиям управления эргатической системой в условиях отсутствия обратной связи*

Поступила в редакцию 07.07.2023
Одобрена к публикации 26.07.2023

Представлено описание информационной системы, обеспечивающей оценку возможности комплекса «интерфейс — оператор» для формирования управляющих команд в эргатической системе в условиях отсутствия зрительного контроля процесса управления. В качестве команд, генерируемых оператором, использовались «виртуальная клавиатура», движение головы, движения глаз. Разработанная система позволяет оценить возможности обучения и работы оператора в условиях обратной связи, когда команды выполняются и под контролем зрения, и при проприоцептивной обратной связи, а также в условиях, когда зрительный контроль отсутствует. Полученные результаты формируют индивидуальную карту оператора, на основании которой возможно более качественно подобрать варианты управления с использованием указанных интерфейсов.

Ключевые слова: эргатическая система, окулографический интерфейс, процесс управления, контроль внимания

Для цитирования:

Туровский Я. А., Алексеев В. Ю., Борзунов С. В. Информационная система оценки подготовки оператора к условиям управления эргатической системой в условиях отсутствия обратной связи // Программная инженерия. 2023. Том 14, № 9. С. 460—468. DOI: 10.17587/prin.14.460-468.

Введение

Расширение требований к эргатическим системам управления, т. е. человеко-машинным системам, где человек включен в контур управления, приводит к эволюционированию этих систем. Одной из веток эволюции является использование новых каналов генерации команд человеком-оператором. Кроме классического подхода, основанного на использовании клавиатур и джойстик-подобных устройств, делаются попытки применения иных каналов генерации команд [1—4].

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00664, <https://rscf.ru/project/23-19-00664/>

Промежуточным вариантом является, например, «виртуальная клавиатура», основанная на проекции «кнопок» на любую поверхность, касаясь которой пользователь набирает нужные команды. Более «отдаленный» в эволюционном плане вариант — генерация управляющих команд с помощью движения головы или движения глаз. При этом, как и в большинстве классических подходов, важную роль играет обратная связь, осуществляемая по каналу зрения [5]. Иными словами, оператор, несмотря на проприоцептивные сигналы (т. е. сигналы от мышц, связок и сухожилий, позволяющих без зрительного контроля определить положение конечности), использует зрение для контроля за

положением управляющей конечности по отношению к консоли управления [6].

В то же время в целом ряде случаев оператор эргатической системы вынужден генерировать команды, не используя канал зрения для контроля. Простейшим примером может служить «слепое» переключение механической коробки передач в автомобилях. Очевидно, что в общем случае снижение контроля за подобной генерацией, выражающееся в отсутствии использования зрительного контроля, снижает точность работы оператора. При этом возникает и следующая проблема — не развиты механизмы оценки «слепого управления» даже с использованием классических подходов в генерации оператором управляющих команд. В ситуации же использования альтернативных интерфейсов (окулографического, миографического, акселерометрического) автоматизация оценки способности оператора к генерации заданных команд является ключевым механизмом не только профессионального отбора, но и в задачах обучения пользователя, и создания эргономически-обоснованных систем управления [7, 8]. Результатом учета индивидуальных параметров работы оператора является совершенствование самих человеко-машинных интерфейсов.

Таким образом, целью работы являлась разработка информационной системы, обеспечивающей оценку возможности комплекса «интерфейс—оператор» формировать управляющие команды для эргатической системы в условиях отсутствия зрительного контроля оператором процесса управления.

1. Модель данных исследовательского контроля

Рассмотрим задачу исследовательского контроля оператора [9] с использованием дистанционной видеоокулографии, оптикоокулографии с носимого устройства [10–13], треккинга положения головы и верхней конечности.

Управляющие сигналы представляем в виде последовательности точек на экране, на котором введена двумерная система координат K . Множество отсчетов времени обозначим через $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, где n — порядковый номер отсчета времени. Рассмотрим задачу о временном ряде управляющих сигналов, формирующих в пространстве $K \times T$ индивидуальную траекторию, отвечающую действиям оператора при решении целевой задачи. В случае декартовой системы координат такой временной ряд имеет вид

$$R = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n), \dots\}.$$

Часть экрана, ограниченную областью внимания оператора, будем считать либо квадратом, разделенным на части σ_k , где k — порядковый номер области (подобласти, также являющимися квадратами, рис. 1, а), либо кругом, разделенным на секторы (рис. 1, б). Указанные части или секторы отражают различные ареалы, подлежащие наблюдению или контролю со стороны оператора.

В случае области генерации оператором команд в виде квадрата перейдем от временного ряда к последовательности подобластей σ_k . Для

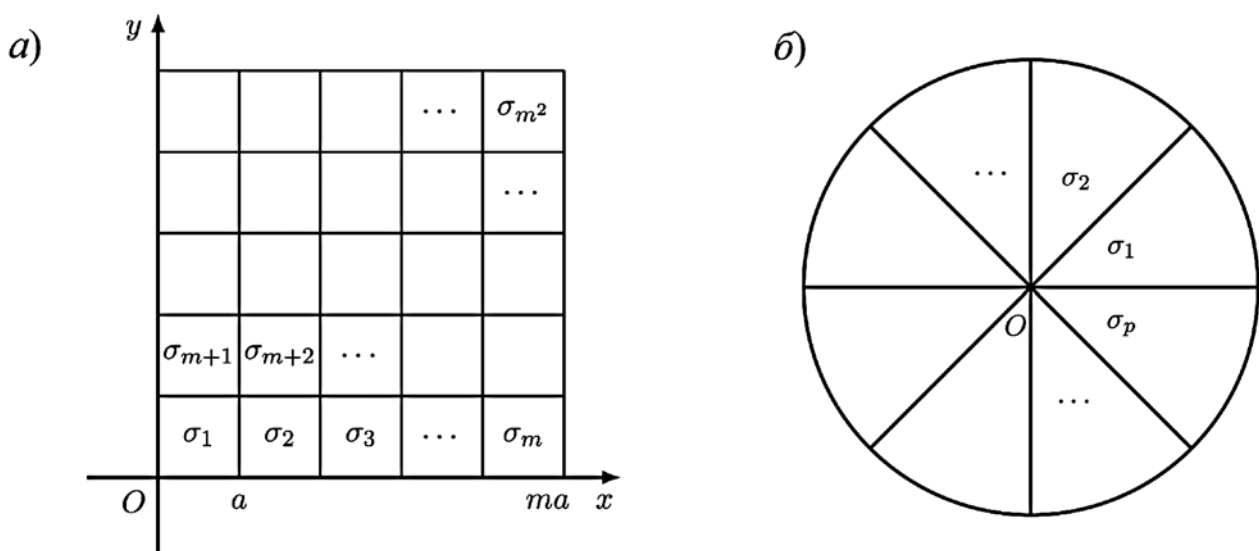


Рис. 1. Область внимания оператора в виде квадрата, разделенного на подобласти σ_k (а), и в виде круга с делением на секторы σ_k (б)

этого воспользуемся отображением, согласно которому декартовым координатам точки ставится в соответствие порядковый номер подобласти:

$$(x_k, y_k) \rightarrow \left\lfloor \frac{x_k}{a} \right\rfloor + m \left\lfloor \frac{y_k}{a} \right\rfloor + 1,$$

где через $\lfloor \cdot \rfloor$ обозначена целая часть вещественного числа; a — линейный размер каждой из m^2 подобластей.

Аналогично, в случае с кругом, разделенным на секторы, получим:

$$(x_k, y_k) \rightarrow \left\lfloor \frac{q\varphi}{2\pi} \right\rfloor,$$

где q — число подобластей, а угловая координата в полярной системе координат выражена через абсциссу и ординату:

$$\varphi = \begin{cases} \arctg \frac{y_k}{x_k}, & x > 0; \\ \arctg \frac{y_k}{x_k} + \pi, & x < 0, y \geq 0; \\ \arctg \frac{y_k}{x_k} - \pi, & x < 0, y < 0; \\ \frac{\pi}{2} \text{sign}(y), & x = 0. \end{cases}$$

Временной ряд $R = \{(\sigma_1), (\sigma_2), \dots, (\sigma_k), \dots\}$ представляет собой последовательность тех подобластей, на которых сконцентрирован определяемый системой фокус генерации команд оператором в текущий момент времени t_k . В результате получен динамический ряд R' , для изучения структуры которого используются стандартные методы регрессионного анализа. Для этого нам потребуется ввести аналог расстояния между элементами σ_i и σ_j , где $i, j \in \{1, 2, \dots, m^2\}$.

В случае, изображенном на рис. 1, a , используем аналог манхэттенского расстояния («расстояния городских кварталов»). Как непосредственно следует из построения, элемент σ_i расположен в строке с номером $\left\lfloor \frac{i-1}{m} \right\rfloor + 1$ и в столбце с номером $1 + (i-1) \bmod m$, если начинать нумерацию от левого нижнего угла. Таким образом, по определению полагаем расстояние между элементами σ_i и σ_j равным

$$d(i, j) = \frac{1}{2(m-1)} \times \left(|(i-1) \bmod m - (j-1) \bmod m| + \left| \left\lfloor \frac{i-1}{m} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{j-1}{m} \right\rfloor \right| \right).$$

Заметим, что множитель $\frac{1}{2(m-1)}$ обеспечивает

выполнение условия нормировки расстояния на единицу, $(\forall i, j) : 0 \leq d(i, j) \leq 1$.

Далее, для случая на рис. 1, b , расстояние можно определить по более простой формуле:

$$d(i, j) = \left[\frac{m-1}{2} \right]^{-1} \min(|i-j|, q - |i-j|).$$

Как видим, эта функция также нормирована на единицу.

Траектория перемещения курсора в ходе генерации пользователем управляющих команд содержит начальную точку $(x_s, y_s) \in \sigma_s$ и конечную точку $(x_f, y_f) \in \sigma_f$. Мерой отклонения реальной траектории, фиксируемой в эксперименте, от прямой $(x_s, y_s) - (x_f, y_f)$ будем считать величину среднеквадратичного отклонения (СКО).

Введем понятие карты пользователя M , которая является матрицей размерности $p \times p$. Строки соответствуют начальной точке траектории на экране, столбцы — конечной.

Элементы M_{ij} , где $i = 1, \dots, p$, $j = 1, \dots, p$, равны значению СКО от прямой $\sigma_i - \sigma_j$. Таким образом, эта матрица содержит индивидуальные характеристики конкретного оператора, отражающие «сложность» достижения именно этим оператором подобласти j , если в качестве начальной подобласти выбрана подобласть с номером i . Заметим, что карта пользователя не является симметричной, что связано с физиологическими особенностями действий данного оператора.

2. Программная реализация системы

В программе реализуется три типа интерфейса «человек-компьютер» (рис. 2) и на каждый интерфейс приходится два этапа тестирования оператора: с обратной связью и без нее.

Согласно рис. 2 в систему интегрированы три интерфейса — «виртуальная клавиатура», управление курсором движением головы и окулографический интерфейс, интегрированный в очки, надеваемые пользователем. Реализация на одной платформе трех разных человеко-машинных интерфейсов позволяет стандартизировать исследование и избежать сложностей, связанных с оценкой особенностей оператора, реализованных на разных программно-аппаратных решениях, имеющих существенные различия не только в ИТ-аспекте, но и, например, в характере предоставляемой как оператору, так и исследователю информации.

В ходе тестирования с обратной связью от пользователя требуется определенным образом,

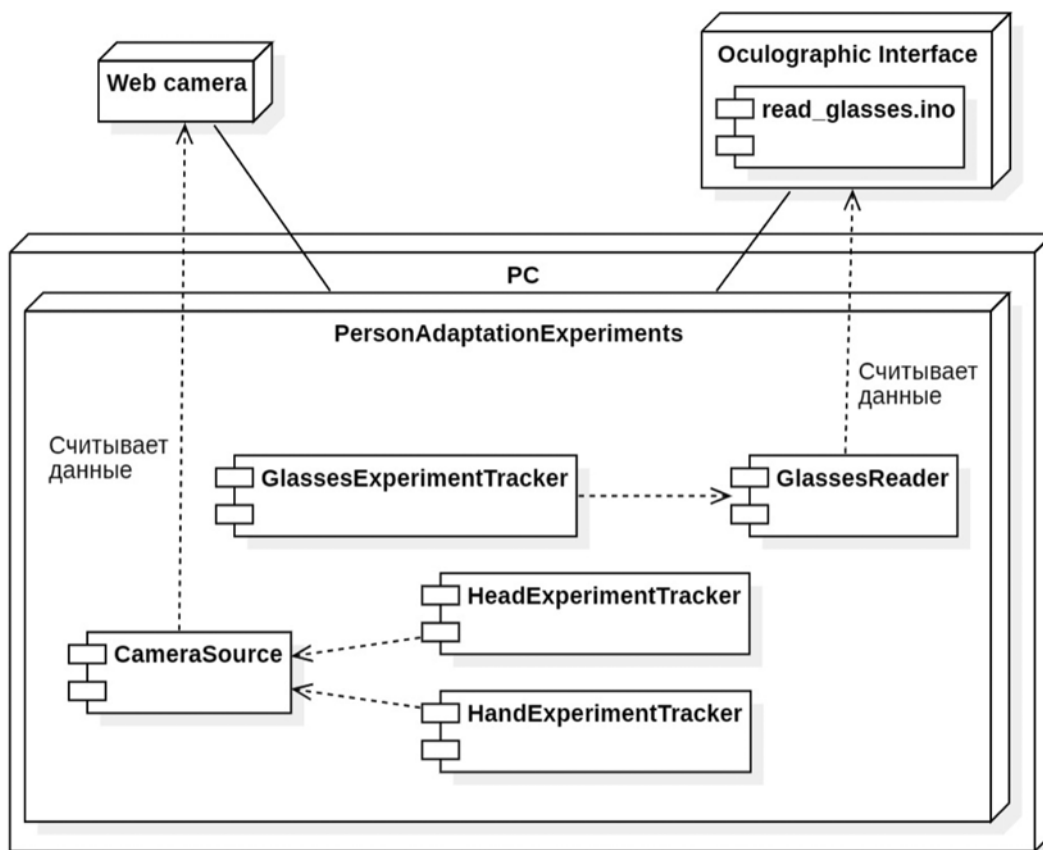


Рис. 2. Схема развертывания системы

зависящим от используемой реализации интерфейса «человек-компьютер», управлять оранжевым маркером на экране монитора. Задачей является перемещение курсора в область на поле с красным маркером (маркер цели), который через заданные промежутки времени меняет свое местоположение (рис 3, а, см. третью сторону обложки). Желтым цветом подсвечивается маркер, ближайший к маркеру, управляемому испытуемым. Если ближайшим к маркеру, управляемым испытуемым, является маркер цели, то цвет красного изменяется на зеленый (рис. 3, б, см. третью сторону обложки), что обозначает корректность исполняемой команды. Маркер цели меняет свое положение через промежуток времени, не более чем $t_{timeout}$. При изменении цвета маркера цели на зеленый, время до изменения положения маркера цели становится равным $\max(\min(t_{hold} - t_{passed}, t_{timeout} - t_{passed}), 0)$, где t_{passed} — момент последнего изменения положения маркера цели; t_{hold} — промежуток времени, предшествующий конкретному моменту проведения расчетов, в течение которого корректность выполнения команды должна составлять $\geq 95\%$.

При работе системы в режиме «без обратной связи» ход эксперимента остается прежним, за исключением следующих изменений: контролируем

ый пользователем маркер невидим пользователю, маркер, ближайший к управляемому пользователем, остается серым, если не является маркером цели, либо красным в противном случае (рис. 3, в, см. третью сторону обложки).

Всего в программе реализованы три типа интерфейсов «человек-компьютер», два из которых построены на технологии компьютерного зрения, а один использует методы инфракрасной окулографии.

Первый интерфейс по изображению с веб-камеры с привлечением моделей компьютерного зрения распознает набор ключевых точек либо левой, либо правой кисти испытуемого. Из набора выделяется точка, соответствующий кончику указательного пальца, который используется испытуемым для управления программой в процессе эксперимента. В ходе эксперимента с обратной связью на экране перед испытуемым демонстрируется изображение с веб-камеры, на котором видны его кисть, управляемый пользователем маркер и разметка поля с маркером цели (рис. 3, а, б, см. третью сторону обложки). В режиме работы без обратной связи перед пользователем находится только статичное изображение с разметкой поля и маркером цели (рис. 3, в, см. третью сторону обложки).

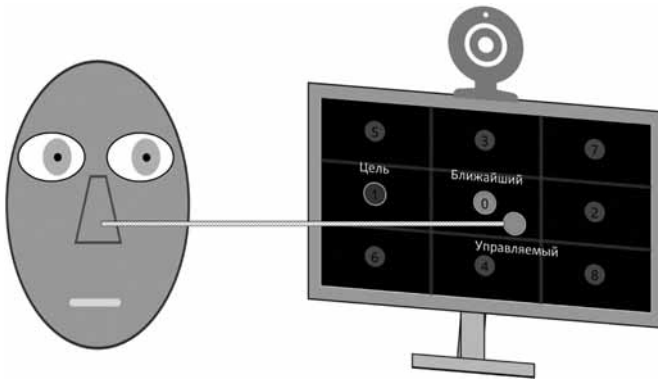


Рис. 4. Общая схема проведения эксперимента, при котором управление осуществляется смещением и вращением головы

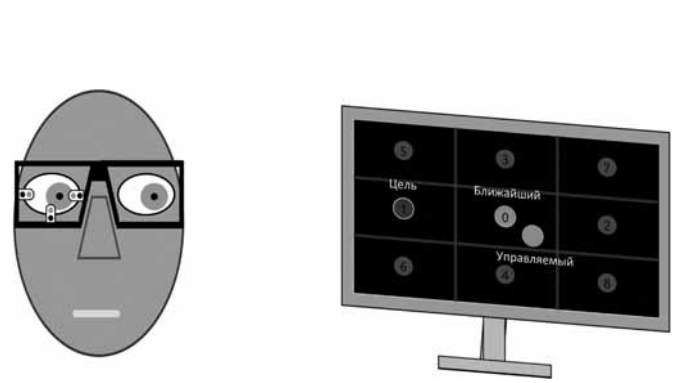


Рис. 5. Общая схема проведения эксперимента, при котором управление осуществляется через окулоинтерфейс

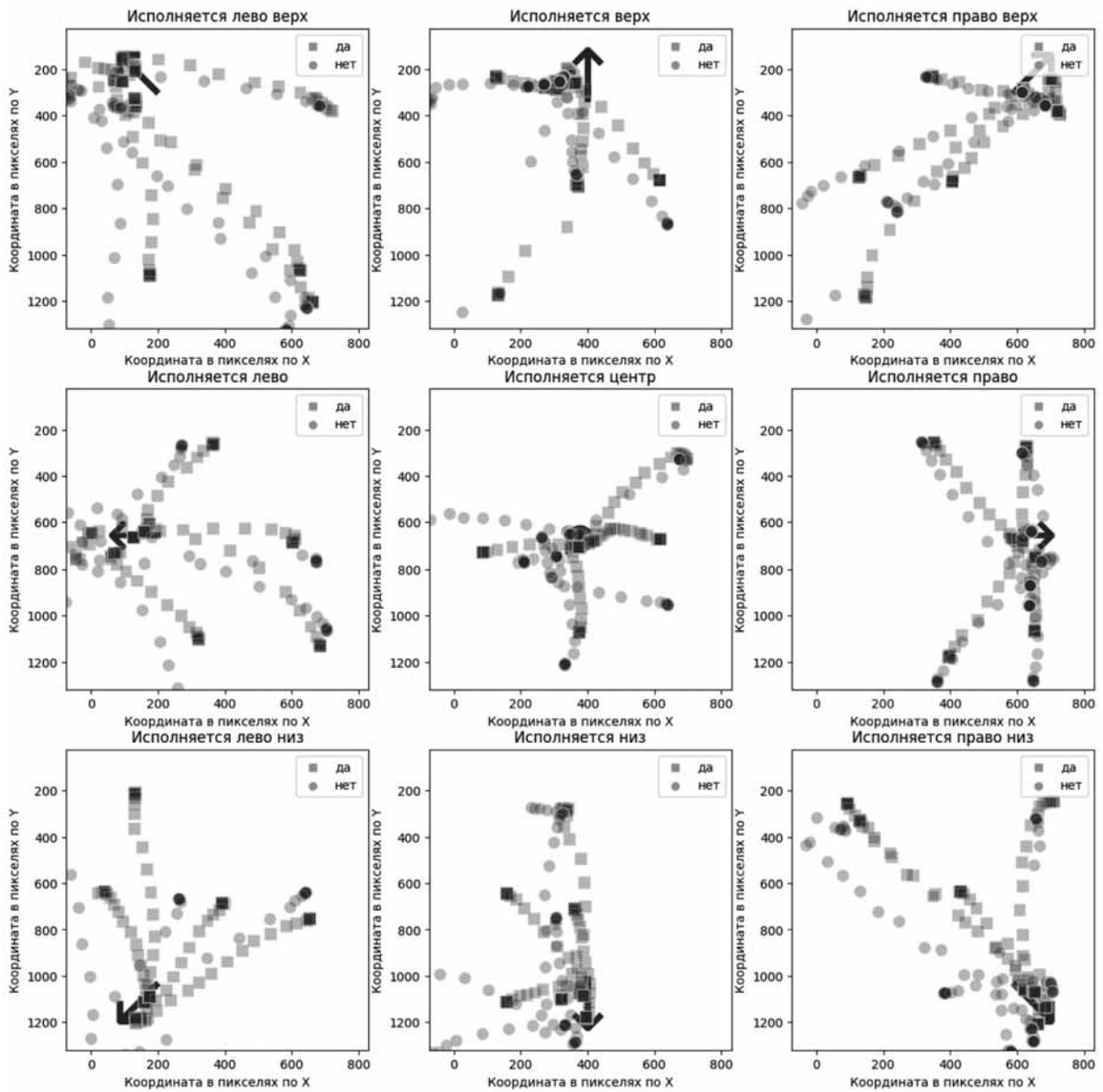


Рис. 6. Визуализация карты траектории курсора управляющей команды, генерируемой рукой пользователя. Квадратный маркер — области, где рука пользователя останавливалась более чем на 2 с при наличии обратной связи по зрительному каналу; круглый маркер — без контроля зрения. Черная стрелки и надписи над каждым из девяти рисунков показывают область, в которую должен быть перемещен курсор для формирования команды

При работе со вторым интерфейсом по данным с видеокamеры рассчитываются расстояние до головы оператора и ориентация головы в пространстве, после чего по известному положению камеры и монитора просчитывается точка пересечения луча, направленного вперед от головы испытуемого, и экрана монитора (рис. 4).

Третий вариант функционирования системы осуществляет расчет положения управляемого испытуемым маркера с использованием инфракрасного окулоинтерфейса (рис. 5). На надетых на испытуемых очках имеются три датчика, состоящих из пары инфракрасного светодиода и фоторезистора инфракрасного диапазона. При изменении направ-

ления взгляда пользователя определенным образом изменяется значение отраженного от глаза света инфракрасного диапазона, регистрируемого фоторезисторами. По значению регистрируемой светимости на каждом из датчиков созданная на этапе калибровки интерфейса модель регрессии предсказывает точку внимания пользователя на экране.

Рассмотрим результаты работы системы с точки зрения поставленной задачи. Для улучшения анализа системы «оператор—интерфейс» для специалистов в области нейрофизиологии и эргономики формируются карты, демонстрирующие траектории движения курсора, управляемого пользователем (рис. 6–8). Таким образом, индивидуальные

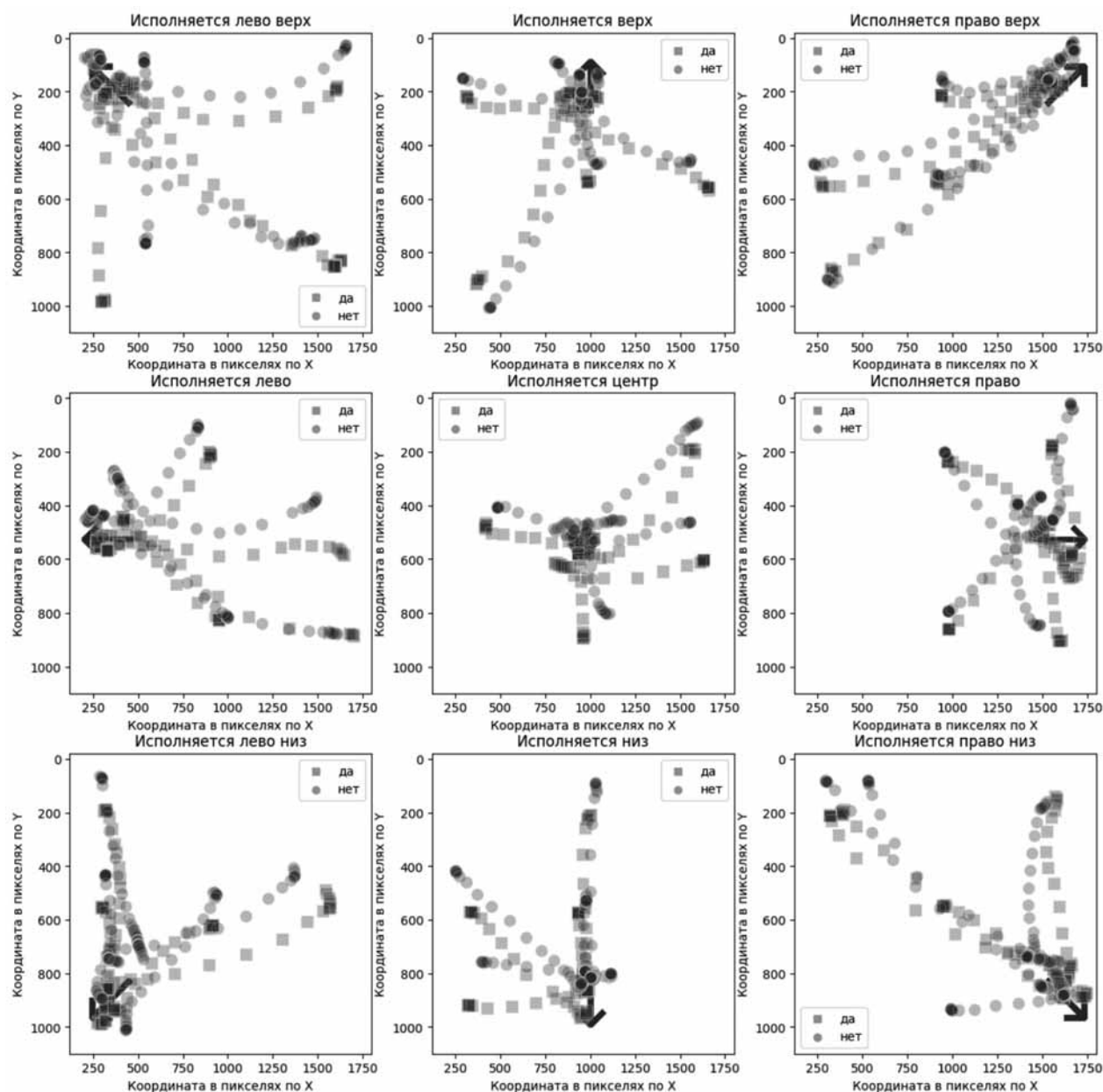


Рис. 7. Визуализация карты траектории курсора управляющей команды, генерируемой движениями головы пользователя. Остальные обозначения см. рис. 6

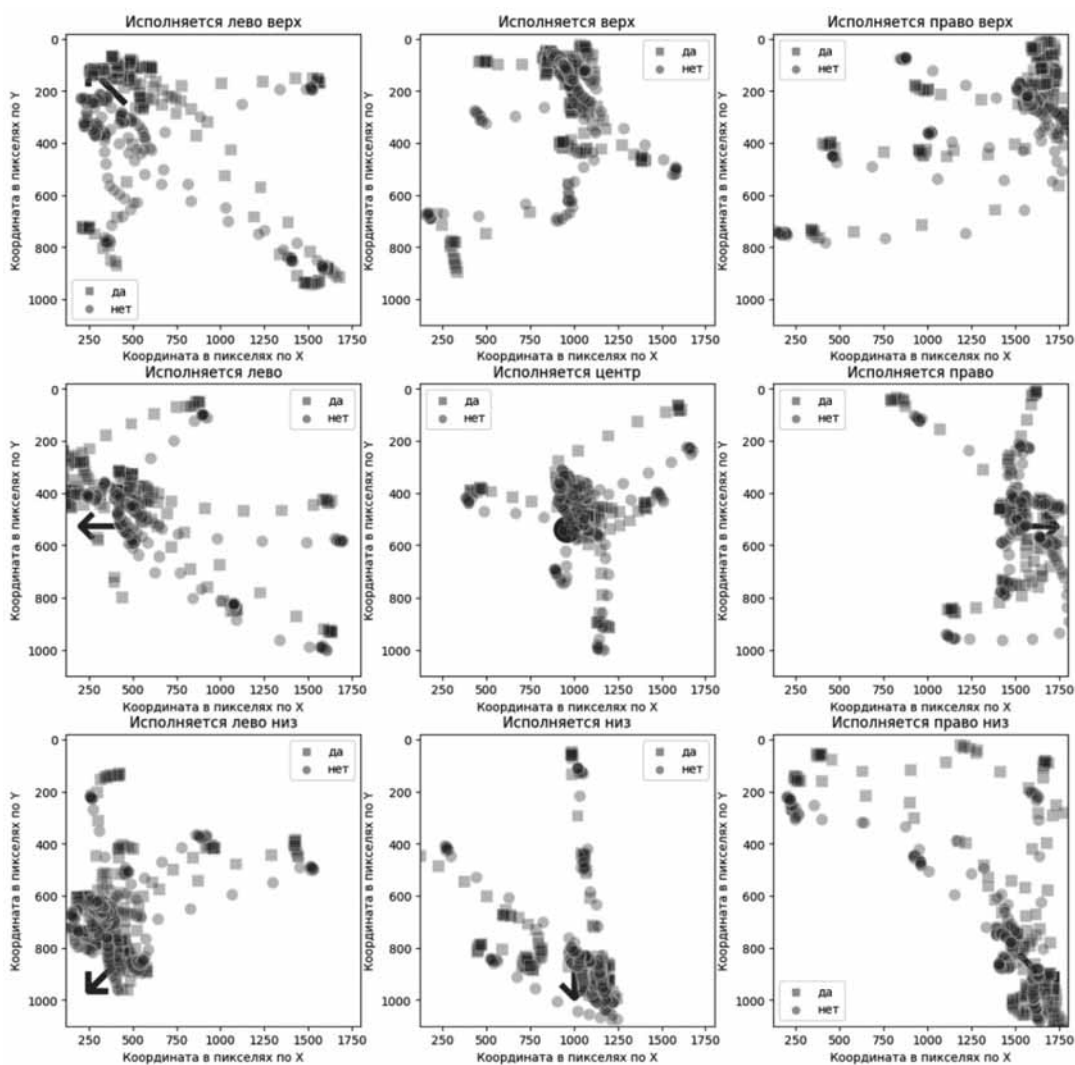


Рис. 8. Визуализация карты траектории курсора управляющей команды, генерируемой движениями глаз пользователя. Остальные обозначения см. рис. 6.

различия траекторий курсоров, формирующих команды, позволяют оценить возможности расположения тех или иных «маркеров», «циферблатов», «экранов» и «тумблеров» на сенсорных экранах консоли управления. Такая оценка проводится исходя из возможностей и особенностей оператора к генерации команд, в зависимости от нахождения элементов управления на разных участках экрана (консоли управления).

Полученные карты в дальнейшем обрабатываются исходя из целей и задач психофизиологического эксперимента.

Заключение

Разработана и реализована в виде программного продукта информационная система оценки под-

готовки оператора к условиям управления эргатической системой в условиях отсутствия обратной связи по зрительному каналу. Система оценивает управляющие команды, генерируемые пользователем как с использованием традиционного канала коммуникации в виде движения верхней конечности, так и с использованием альтернативных каналов в виде движения головы или же движения глаз. Получаемые результаты, оцениваемые как отклонение траекторий управляемого курсора при перемещении в области экрана для генерации команд, позволяют оценить индивидуально-типологические особенности оператора, внести изменение в расположение элементов управления, минимизирующее ошибки и время генерации команд оператором, и внести изменения в программно-аппаратную часть интерфейса, адапти-

руя его под конкретного пользователя. Помимо задач, связанных с эргономикой, применение системы возможно и в задачах реабилитации больных неврологического профиля и с повреждениями опорно-двигательного аппарата. Дальнейшим развитием указанной системы станет возможность автоматизированного расчета положения управляющих и информирующих элементов на консоли оператора в зависимости от выявленных индивидуальных особенностей генерации им управляющих команд в рамках эргатической системы.

Список литературы

1. Hoffman J. E. Visual attention and eye movements // Attention. Hove, UK. Psychology Press, 1998. P. 119–154.
2. Tobii. Tobii Pro Glasses 3. URL: <https://www.tobii.com/product-listing/tobii-pro-glasses-3/> (дата обращения 15.06.2023).
3. Wolpaw J. R., Birbaumer N., McFarland D. J. et al. Brain-computer interfaces for communication and control // Clin Neurophysiol. 2002. Vol. 113, No. 6. P. 767–791. DOI: 10.1016/s1388-2457(02)00057-3.
4. Черникова Л. А. Изучение механизмов формирования новых двигательных навыков в норме и в процессе реабилитации больных с поражением центральных двигательных структур. Отчет НИР: грант № 04-04-48378. Российский фонд фундаментальных исследований. 2004.
5. Трембач А. Б., Коваленко Ю. Н. Динамика биоэлектрической активности головного мозга при повышении устойчивости ортоградной позы у человека посредством зрительной обратной связи // Известия ТРТУ. 2000. № 4 (18). С. 118–120.
6. Дубовский В. А., Савченко В. В., Щербина Н. В., Кузьменко А. Ф. Формирование у человека навыка экстренного

реагирования на внешние стимулы движениями руки и тела // В сборнике: Мониторинг техногенных и природных объектов. Материалы международной научно-технической конференции. 2017. С. 106–112.

7. Хетчиков М. Д. Актуальные проблемы военной эргономики и возможные пути их разрешения в современных условиях // Вестник Академии военных наук. 2021. № 2 (75). С. 174–181.

8. Сергеев С. Ф. Эргономика сложных систем: типы научной рациональности и энактивизм // Эргодизайн. 2019. № 4 (6). С. 156–161. DOI: 10.30987/2619-1512-2019-2019-4-156-161.

9. Психология труда, инженерная психология и эргономика: учебник для вузов / под редакцией Е. А. Климова, О. Г. Носковой, Г. Н. Солнцева. 2-е изд. М.: Юрайт, 2023. 661 с.

10. Благинин А. А., Синельников С. Н., Натуральников И. О. и др. Оценка особенностей распределения внимания операторов с помощью методики стационарного айтрекинга // Вестник психофизиологии. 2019. № 3. С. 89–91.

11. Туровский Я. А., Алексеев В. Ю. Сравнение подходов к отслеживанию распределения внимания операторов с использованием окулографических интерфейсов // Программная инженерия. 2023. Том 14, № 3. С. 137–145. DOI: 10.17587/prin.14.137-145.

12. Алексеев В. Ю., Туровский Я. А. Система контроля области внимания оператора // Энергосбережение и эффективность в технических системах: Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции с международным участием для студентов, молодых ученых и специалистов, Тамбов, 19 октября 2022 года. Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2022. С. 118–119.

13. Туровский Я. А., Боронников А. И. Влияние обратной связи на характеристики освоения команд, генерируемых в задачах миографических интерфейсов // Технологии живых систем. 2020. Том 17, № 2. С. 39–45. DOI: 10.18127/j20700997-202002-04.

Information System for Evaluation of Operator's Preparation for Control Conditions of Ergatic System without Feedback

Ya. A. Turovsky, Principal Researcher, Yaroslav_turovsk@mail.ru,
V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997,
Russian Federation; Voronezh State University, Voronezh, 394018, Russian Federation
V. Yu. Alekseev, Postgraduate Student, quindecim413@mail.ru,
S. V. Borzunov, Associate Professor, sborzunov@gmail.com,
Voronezh State University, Voronezh, 394018, Russian Federation

Corresponding author:

Yaroslav A. Turovsky, Principal Researcher,
V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997,
Russian Federation; Head of Lab,
Voronezh State University, Voronezh, 394018, Russian Federation
E-mail: Yaroslav_turovsk@mail.ru

Received on July 07, 2023

Accepted on July 26, 2023

A description of an information system is presented that provides an assessment of the ability of the «interface-operator» complex to form control commands for an ergatic system in the absence of visual control of the control process.

Keywords: *ergatic system, oculographic interface, control process, attention control*

Acknowledgements: *The reported study was funded by RSF according to the research project no. 23-19-00664, <https://rscf.ru/project/23-19-00664/>*

For citation:

Turovsky Ya. A., Alekseev V. Yu., Borzunov S. V. Information System for Evaluation of Operator's Preparation for Control Conditions of Ergacy System without Feedback, *Programmnyaya Ingeneria*, 2023, vol. 14, no. 9, pp. 460—468. DOI: 10.17587/prin.14.460-468.

References

1. **Hoffman J. E.** Visual attention and eye movements, *Attention*, Hove, UK, Psychology Press, 1998, pp. 119—154.
2. **Tobii Pro Glasses 3**, available at: <https://www.tobii.com/product-listing/tobii-pro-glasses-3/> (date of access 15.06.2023).
3. **Wolpaw J. R., Birbaumer N., McFarland D. J.** et al. Brain-computer interfaces for communication and control, *Clin Neurophysiol*, 2002, vol. 113, no. 6. pp. 767—791. DOI: 10.1016/s1388-2457(02)00057-3.
4. **Chernikova L. A.** The study of the mechanisms of formation of new motor skills in the norm and in the process of rehabilitation of patients with lesions of the central motor structures. Research report: grant No. 04-04-48378. Russian Foundation for Basic Research. 2004 (in Russian).
5. **Trembach A. B., Kovalenko Yu. N.** Dynamics of the bio-electrical activity of the brain with an increase in the stability of the orthograde posture in humans through visual feedback, *Izvestiya TSURE*, 2000, no. 4 (18), pp. 118—120 (in Russian).
6. **Dubovsky V. A., Savchenko V. V., Shcherbina N. V., Kuzmenko A. F.** Formation of a person's skill of emergency response to external stimuli with hand and body movements, *In the collection: Monitoring of man-made and natural objects. Materials of the international scientific and technical conference*, 2017, pp. 106—112 (in Russian).
7. **Khetchikov M. D.** Actual problems of military ergonomics and possible ways to solve them in modern conditions, *Vestnik Akademii voennykh nauk*, 2021, no. 2 (75), pp. 174—181 (in Russian).
8. **Sergeev S. F.** Ergonomics of complex systems: types of scientific rationality and enactivism, *Ergodesign*, 2019, no. 4 (6), pp. 156—161. DOI: 10.30987/2619-1512-2019-2019-4-156-161 (in Russian).
9. **Psychology of work, engineering psychology and ergonomics** / Eds by E. A. Klimov, O. G. Noskova, G. N. Solntseva. 2nd ed., Moscow, Yurayt, 2023, 661 p. (in Russian).
10. **Blagini A. A., Sinel'nikov S. N., Natural'nikov I. O.** et al. Evaluation of the features of the distribution of attention of operators using the method of stationary eye-tracking, *Vestnik Psihofiziologii*, 2019, no. 3, pp. 89—91 (in Russian).
11. **Turovsky Ya. A., Alekseev V. Yu.** Comparison of Tracking Approaches Distribution of Attention to Operators with Use of Oculographic Interfaces, *Programmnyaya Ingeneria*, 2023, vol. 14, no. 3, pp. 137—145. DOI: 10.17587/prin.14.137-145 (in Russian).
12. **Alekseev V. Yu., Turovsky Ya. A.** Control system for the operator's attention area, *Energy saving and efficiency in technical systems: Proceedings of the IX All-Russian scientific and technical conference with international participation for students, young scientists and specialists*, Tambov, 19 October 2022, Tambov, Publishing Center of FGBOU VO "Tambov State Technical University", 2022, pp. 118—119 (in Russian).
13. **Turovsky Ya. A., Boronnikov A. I.** Influence of feedback on the characteristics of mastering commands generated in tasks of myographic interfaces, *Tehnologii zhivyyh system*, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 39—45 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ

Продолжается подписка на журнал «Программная инженерия» на второе полугодие 2023 г.

Оформить подписку можно через подписные агентства
или непосредственно в редакции журнала (для юридических лиц).

Подписной индекс по Объединенному каталогу

«Пресса России» — 22765

Сообщаем, что с 2020 г. возможна подписка
на электронную версию нашего журнала:

ООО «ИВИС»: тел. (495) 777-65-57, 777-65-58; e-mail: sales@ivis.ru;
ООО «УП Урал-Пресс Округ». Для оформления подписки (индекс 013312)
следует обратиться в филиал по месту жительства — <http://ural-press.ru>

Адрес редакции: 107076, Москва, Матросская Тишина, д. 23, с. 2, оф. 45,

Издательство «Новые технологии»,
редакция журнала «Программная инженерия»

Тел.: (499) 270-16-52. E-mail: prin@novtex.ru

ООО "Издательство "Новые технологии". 107076, Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2
Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *А. В. Чугунова*.

Сдано в набор 28.07.2023 г. Подписано в печать 29.09.2023 г. Формат 60×88 1/8. Заказ P1923
Цена свободная.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунок к статье А. П. Соколова, Е. А. Питухина, А. И. Шабасва,
 О. Н. Галактионова., О. А. Зятевой
 «КОНЦЕПЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ
 ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ
 ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА»

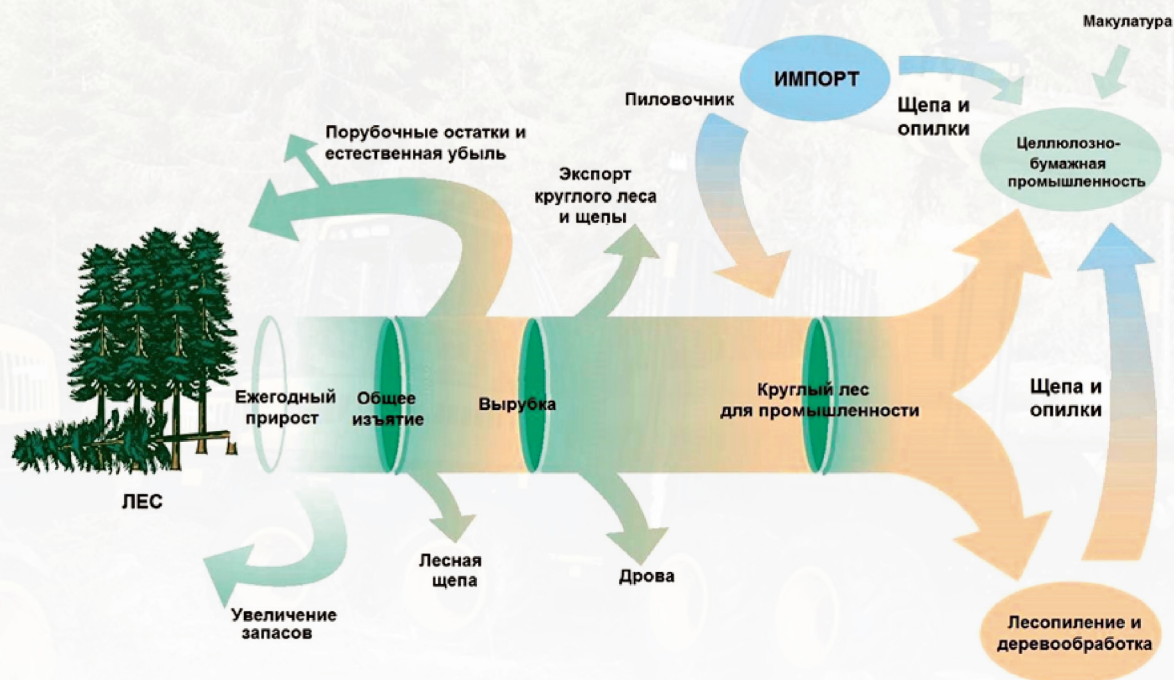


Рис. 5. Схема сквозных процессов использования и переработки древесины

Рисунок к статье Я. А. Туровского, В. Ю. Алексева, С. В. Борзунова
 «ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРА К
 УСЛОВИЯМ УПРАВЛЕНИЯ ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ
 В УСЛОВИЯХ ОТСУТСТВИЯ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ»

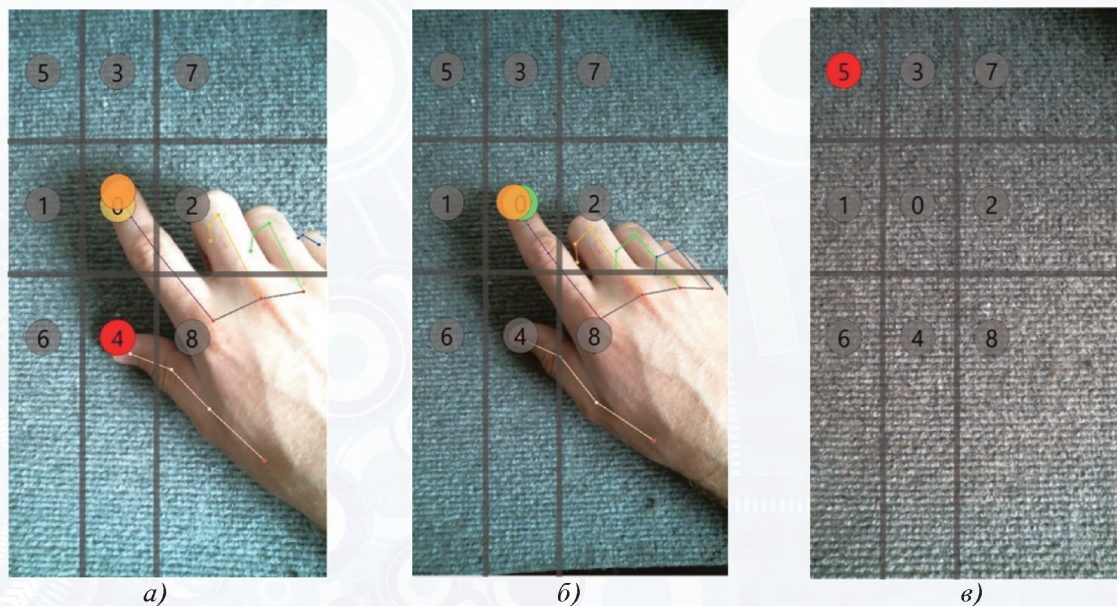


Рис. 3. Демонстрация работы программы через интерфейс управления рукой:
 а – эксперимент с обратной связью, маркер цели не выбран; б – эксперимент с обратной связью,
 маркер цели выбран; в – эксперимент без обратной связи



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



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

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

Ежемесячный
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

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков:

107076, Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2, оф. 45. Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ".

Тел.: (499) 270-16-52. E-mail: antonov@novtex.ru