

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ – РЕСПУБЛИКАНСКИЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НАУЧНО-КОНСУЛЬТАЦИОННЫЙ ЦЕНТР ЭКСПЕРТИЗЫ»
(ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ)**

ИННОВАТИКА И ЭКСПЕРТИЗА

Выпуск 2(30)

МОСКВА 2020

Editor-in-chief

G.I. Bakhturin, Director General of SRI FRCEC, Doctor of Engineering

Deputy Chief Editor

P.B. Melnik, Deputy Director General of SRI FRCEC for R&D, Doctor of Engineering

Members of Board

I.I. Kurochka, Scientific Secretary, Doctor of Physics and Mathematics;

N.A. Mironov, Director of Centre, Doctor of Engineering;

Yu.P. Rybakov, Director of Centre, Doctor of Engineering, Ph.D.;

T.I. Turko, Director of Centre, Doctor of Biology;

A.B. Logunov, Director of Centre, Doctor of Military Sciences;

A.M. Mironov, Head of Main Department, Ministry of Defence of Russian Federation;

A.M. Tishin, Professor of Lomonosov Moscow State University

Members of Technical Edition

A.A. Tugarinov, Executive Technical Editor for the collection;

G.G. Rodionova, Responsible for work with reviewers;

V.V. Tsukanova, Technical Editor;

A.V. Sokolova, Corrector;

V.E. Geluta, Translator

Extended information about members of the Editorial Board is presented at the website: www.inno-exp.ru

Главный редактор

Г.И. Бахтурин, генеральный директор ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук

Зам. гл. редактора

П.Б. Мельник, зам. ген. директора ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ по научной работе, канд. техн. наук

Члены редколлегии

И.И. Курочка, ученый секретарь, канд. физ-мат. наук;

Н.А. Миронов, директор центра, канд. техн. наук;

Ю.Л. Рыбаков, директор государственного центра, канд. техн. наук, д-р биол. наук;

Т.И. Турко, директор центра, канд. биолог. наук;

А.Б. Логунов, директор центра, канд. воен. наук;

А.М. Миронов, начальник Главного управления Минобороны России, канд. техн. наук;

А.М. Тишин, проф. физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д-р физ.-мат. наук

Члены технической редакции

А.А. Тугаринов, отв. техн. редактор;

Г.Г. Родионова, отв. за работу с рецензентами;

В.В. Цуканова, техн. редактор;

А.В. Соколова, корректор;

В.Е. Гелюта, переводчик

Расширенная информация о членах редколлегии представлена на сайте: www.inno-exp.ru

Innovatics and Expert Examination. The scientific works of the Federal State Budgetary Scientific Institution «Scientific Research Institute – Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services» (SRI FRCEC). Moscow. SRI FRCEC, 2020. Vol. 2 (30). 196 p.

The collection publishes c works of employees of the FSBI SRI FRCEC, experts of the Federal Roster of Experts in scientific and technological fields, as well as representatives of other scientific, educational and industrial organizations on topical issues for Russia in the field of innovation, scientific, scientific & technological and special expert examination, organization of scientific and economic activity, engineering and technology as well as national security.

In this issue, the authors have presented the results of studies related to the legal regulation of expert activities, the methodology for monitoring scientific achievements, staffing the economy in the context of the transition to innovative development, problems of the development of environmental entrepreneurship, issues of organizing networking in the field of science, etc.

Published materials may be of interest to managers of various ranks, researchers and teachers, applicants for scientific degrees and university students.

ISSN 1996-2274

© SRI FRCEC, 2020

DOI 10.35264/1996-2274

DOI 10.35264/1996-2274-2020-2

EAN-13: 9771996227771

This collection was registered on 12 April 2007 in ROSOHRANKULTURA Agency PINº FS77-27730.

Editorial Address: 123317, Moscow, Antonov-Ovseenko St., 13, Bldg. 1

Tel.: (499) 259-69-92, **Fax:** (499) 256-45-41

E-mail: info@extech.ru

http: <http://www.extech.ru>

Инноватика и экспертиза. Научные труды Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» (ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ). М.: ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, 2020. Вып. 2 (30). 196 с.

В сборнике публикуются научные труды сотрудников ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, экспертов Федерального реестра экспертов научно-технической сферы, а также представителей других научных, образовательных и производственных организаций по актуальным для России проблемам в области инноватики, научной, научно-технической и специальной экспертизы, организации научной и хозяйственной деятельности, техники и технологий, национальной безопасности.

В данном выпуске авторы представили результаты исследований, связанных с правовым регулированием экспертной деятельности, методологией мониторинга научных достижений, кадровым обеспечением экономики в условиях перехода к инновационному развитию, проблемами развития экологического предпринимательства, вопросами организации сетевого взаимодействия в сфере науки и др.

Публикуемые материалы могут представлять интерес для руководящих работников различного ранга, научных работников и преподавателей, соискателей научных степеней и студентов вузов.

ISSN 1996-2274

© ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, 2020

DOI 10.35264/1996-2274

DOI 10.35264/1996-2274-2020-2

EAN-13: 9771996227771

Сборник зарегистрирован 12 апреля 2007 г. в Росохранкультуре, ПИ № ФС77-27730.

Адрес редакции: 123317, г. Москва, ул. Антонова-Овсеенко, д. 13, стр. 1

Тел.: (499) 259-69-92, **факс:** (499) 256-45-41

E-mail: info@extech.ru

http: <http://www.extech.ru>

CONTENTS

INNOVATION: THEORY AND PRACTICE

T.I. Turko, D.N. Popikov, N.A. Kruchak. Innovative development of the Russian Eastern Regions: statistical analysis	10
I.A. Repina, M.I. Varentsov, D.G. Chechin, A.Yu. Artamonov, N.E. Bodunkov, M.Yu. Kalyagin, D.N. Zhivoglotov, A.M. Shevchenko, A.I. Varentsov, N.E. Kuksova, V.M. Stepanenko, A.A. Shestakova. Application of unmanned aircraft for studying of the atmospheric boundary layer	20

EXPERT EXAMINATION AND ANALYTICAL ACTIVITY

P.B. Melnik. Mathematical model of the expert	40
R.R. Ilyushchenko, T.V. Osipova. Processing of expert estimates when conducting an examination of scientific projects with the involvement of experts of the Federal Roster	65
Yu. N. Andreev. Analysis of the materials of the discussion of the law on science	80
D.S. Zhukov, D.G. Seltser, N.S. Barabash. Scenarios of transformation of regional elites in the late Soviet and post-Soviet periods: results of system-dynamic modeling	96

ECONOMY AND ORGANIZATION OF SCIENTIFIC AND ECONOMIC ACTIVITIES

V.M. Pitulko, R.R. Ilyushchenko, V.V. Kulibaba. Features of rational environmental use in the Russian Federation in the context of accumulated environmental damage	108
--	-----

СОДЕРЖАНИЕ

ИННОВАЦИИ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

Т.И. Турко, Д.Н. Попиков, Н.А. Кручак. Инновационное развитие восточных регионов России: статистическая оценка	10
И.А. Репина, М.И. Варенцов, Д.Г. Чечин, А.Ю. Артамонов, Н.Е. Бодунков, М.Ю. Калягин, Д.Н. Живоглозов, А.М. Шевченко, А.И. Варенцов, Н.Е. Куксова, В.М. Степаненко, А.А. Шестакова. Использование беспилотных летательных аппаратов для исследования атмосферного пограничного слоя	20

ЭКСПЕРТИЗА И АНАЛИТИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

П.Б. Мельник. Математическая модель эксперта	40
Р.Р. Илющенко, Т.В. Осипова. Обработка экспертных оценок при проведении экспертизы научных проектов с привлечением экспертов Федерального реестра	65
Ю.Н. Андреев. Анализ материалов обсуждения закона о науке	80
Д.С. Жуков, Д.Г. Сельцер, Н.С. Барабаш. Сценарии трансформации региональных элит в позднесоветский и постсоветский периоды: результаты системно-динамического моделирования	96

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В.М. Питулько, Р.Р. Илющенко, В.В. Кулибаба. Особенности рационального природопользования в Российской Федерации в контексте накопленного экологического ущерба	108
--	-----

ENGINEERING AND TECHNOLOGY

V.G. Vyskub. Controlling optical beams using mutually complementary scanners	125
I.I. Ryabtsev, S.P. Yurkevichyus, A.E. Gritsenko. Scientific and technological problems of creation of atomic clock and systems of their synchronization	139
V.D. Klyuev, Yu.A. Biryukov, V.V. Panayetova. Resource-saving technologies for processing waste of building materials to ensure environmental safety and their secondary use	145
N.I. Buravchuk, O.V. Guryanova. Use of techogenic raw materials in the technology of ceramic bricks production	160
N.I. Erokhina, L.A. Zernaeva. Improving the reproductive function of cattle by preventing copper deficiency in the body	170

NATIONAL SECURITY

A.B. Logunov, D.V. Olshevsky, A.V. Grenchikhin. On regulation of the placement of scientific and technological information subject to export control in open access	178
A.B. Logunov, D.B. Iziumov, D.V. Olshevsky, A.V. Grenchikhin, E.L. Kondratyuk. Review of domestic and foreign experience in creating means to control the spread of viral infections	188

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

В.Г. Выскуб. Управление оптическими пучками с применением взаимно дополняющих сканаторов	125
И.И. Рябцев, С.П. Юркевичус, А.Е. Гриценко. Научно-технические проблемы создания атомных часов и систем их синхронизации	139
В.Д. Ключев, Ю.А. Бирюков, В.В. Панаева. Ресурсосберегающие технологии переработки отходов строительных материалов для обеспечения экологической безопасности и вторичного их использования	145
Н.И. Буравчук, О.В. Гурьянова. Использование техногенного сырья в технологии керамического кирпича	160
Н.И. Ерохина, Л.А. Зернаева. Улучшение репродуктивной функции крупного рогатого скота путем профилактики недостатка меди в организме	170

НАЦИОНАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

А.Б. Логунов, Д.В. Ольшевский, А.В. Гренчихин. О регулировании размещения научно-технической информации, подпадающей под экспортный контроль, в открытом доступе	178
А.Б. Логунов, Д.Б. Изюмов, Д.В. Ольшевский, А.В. Гренчихин, Е.Л. Кондратюк. Обзор отечественного и зарубежного опыта создания средств контроля распространения вирусных инфекций	188

ИННОВАЦИИ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

DOI 10.35264/1996-2274-2020-2-10-19

ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ ВОСТОЧНЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ: СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

Т.И. Турко, дир. центра ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. биол. наук, ttamara16@extech.ru

Д.Н. Попиков, нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, popikovdn@extech.ru

Н.А. Кручак, вед. аналитик ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, kruchakna@extech.ru

Рецензент: Ю.Н. Андреев

Мировой опыт большинства развитых стран показывает, что базисом их экономического роста является расширение сфер деятельности традиционных отраслей экономики на основе внедрения инновационных технологий. В связи с этим понимание тенденций, особенностей и перспектив научно-технологического развития позволит определить конкурентные преимущества, выявить узкие места, расставить приоритеты при разработке долгосрочных стратегических документов развития не только экономики, но и социальной сферы на уровне как Российской Федерации в целом, так и отдельных территорий. Это, в свою очередь, требует оценки современного состояния, динамики и основных факторов формирования научного и инновационного потенциала. Поскольку инновационный потенциал является многоаспектным понятием, при проведении его оценки и для сопоставления между различными территориями необходимо приведение к единому интегральному показателю.

Ключевые слова: инновации, инновационный потенциал, экономическое развитие, показатели инновационного развития, анализ, Дальний Восток.

INNOVATIVE DEVELOPMENT OF THE RUSSIAN EASTERN REGIONS: STATISTICAL ANALYSIS

T.I. Turko, Director of Centre, SRI FRCEC, Doctor of Biology, ttamara16@extech.ru

D.N. Popikov, Head of Department, SRI FRCEC, popikovdn@extech.ru

N.A. Kruchak, Leading Analyst, SRI FRCEC, kruchakna@extech.ru

The world experience of most developed countries shows that the basis of their economic growth is the expansion of the spheres of activity of traditional sectors of the economy through the introduction of innovative technologies. In this regard, an understanding of the trends, characteristics and prospects of scientific and technological development will allow us to determine competitive advantages, identify bottlenecks, and set priorities in the development of long-term strategic documents for the development of not only the economy, but also the social sphere at the level of both the Russian Federation as a whole and individual territories. This, in turn, requires an assessment of the current state, dynamics and main factors of the formation of scientific and innovative potential. Since innovation potential is a multidimensional concept it is necessary, when assessing it and for comparing it between different territories, to bring it to a single integral indicator

Keywords: innovation, innovative potential, economic development, indicators of innovative development, analysis, the Russian Far East.

Введение

Исторически научно-технический потенциал России формировался в европейской части страны. Дальний Восток имел сырьевую специализацию. Однако по мере осуществления индустриализации и необходимости укрепления обороноспособности страны здесь начинает развиваться военно-промышленный комплекс. На предприятиях формируются исследовательские группы и лаборатории, вследствие чего встал вопрос обеспечения их высококвалифицированными специалистами, что создало предпосылки развития высшей школы и науки. Юг Дальнего Востока стал плацдармом высокотехнологичных производств, работающих в тесной взаимосвязи с научно-исследовательскими, проектными и конструкторскими организациями.

Начало рыночных преобразований обострило традиционные проблемы социально-экономического развития Дальнего Востока. Произошли сокращение государственного финансирования военно-промышленного комплекса, снижение объемов производства, отток наиболее активной и амбициозной части населения. Данные явления изменили состояние и динамику научно-технического потенциала макрорегиона. Начались разрушительные процессы в науке. Высокотехнологичные производства сохранились лишь на единицах предприятий.

Специализация Дальнего Востока вновь сузилась до добычи природных ресурсов. Однако в современных условиях определяющим фактором развития и обеспечения роста экономики становится не обладание природными ресурсами (сырьевая рента), а их эффективное использование, стержнем которого является инновационная деятельность (рента по интеллекту).

В 2008 г. принимается Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года, в которой была провозглашена «структурная диверсификация экономики на основе инновационного технологического развития, в том числе формирование национальной инновационной системы, включая такие элементы, как интегрированная с высшим образованием система научных исследований и разработок, гибко реагирующая на запросы со стороны экономики, инжиниринговый бизнес, инновационная инфраструктура, институты рынка интеллектуальной собственности, механизмы стимулирования инноваций» [1]. Формирование национальной инновационной системы, модернизацию фундаментальной и прикладной науки, а также профессионального образования планировалось завершить к 2012 г.

У Дальнего Востока имелись потенциальные возможности включиться в процесс формирования национальной инновационной системы. Опыт производства высокотехнологичной продукции имелся на авиа- и судостроительных военных заводах, новые технологии в добывающих отраслях были апробированы при реализации шельфовых проектов «Сахалин», реализовались проекты в области гидроэнергетики в Амурской области. Необходимость нивелирования удорожающих факторов и повышение конкурентоспособности дальневосточной продукции подтолкнули предприятия перерабатывающей промышленности к внедрению инновационных технологий. Все это требовало приобретения современного оборудования, привлечения квалифицированных кадров, кооперации крупных компаний и малых инновационных предприятий, интеграции производства и науки, поддержки со стороны банковского сектора. Таким образом, на Дальнем Востоке сложились условия для интенсификации инновационных процессов. Однако реализация мегапроектов на территории субъектов макрорегиона не обеспечила долгосрочный устойчивый рост и инновационный импульс экономике [2].

В целом можно также говорить о недостижении поставленных задач в сфере науки и инноваций Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года. Так, уровень расходов на научные исследования и разработки за 2013–2020 гг. планировалось довести до 3 % валового внутреннего продукта. В 2019 г. затраты на научные исследования и разработки составили 1,2 % валового регионального продукта, что в 2,5 раза ниже заявленного. Продолжающееся снижение престижа российской науки повлекло сокращение более чем на 10 % по сравнению с 2008 г. численности работников,

выполнявших научные исследования и разработки, сократилось количество кандидатов и докторов наук. Доля аспирантов, защитивших диссертации по окончании аспирантуры, упала более чем в 2 раза.

С 2014 г. в целях стимулирования ускоренного развития экономики апробируются новые организационно-экономические механизмы, открывающие возможности развития инновационного бизнеса и интенсификации инновационных процессов, – это территории опережающего социально-экономического развития (ТОСЭР) [3]. Дальний Восток стал пилотной территорией, где к 2019 г. было создано 18 ТОСЭР.

Формирование ТОСЭР декларировалось как создание новых предприятий, новых рабочих мест, привлечение бюджетных и частных инвестиций. Действительно, с 2014 по 2018 г. на территории Дальнего Востока на 8,5 % увеличилось количество организаций, выполняющих научные исследования и разработки (таблица). Вместе с тем численность занятых исследованиями и разработками сократилась на 6 %, а внутренние затраты на исследования и разработки из всех источников финансирования – на 1,1 %.

Динамика инновационного развития Дальнего Востока

Показатель	2008	2014	2016	2018	Прирост (сокращение) в 2018 г. к 2014 г.
Количество организаций, выполняющих научные исследования и разработки, ед.	198	199	221	216	+8,5 %
Численность персонала, занятого исследованиями и разработками, тыс. чел.	15,0	15,0	14,9	14,1	–6,0 %
Внутренние затраты на исследования и разработки за счет всех источников, млрд руб. ¹	20,2	18,8	17,4	18,6	–1,1 %
Доля ДФО в РФ, %	2,3	1,7	1,7	1,8	–
Затраты организаций на технологические инновации, млрд руб. ¹	8,7	76,4	62,5	86,5	+13,2 %
Доля ДФО в РФ, %	1,4	5,0	4,6	5,9	–
Удельный вес инновационных товаров, работ, услуг в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг, %	1,9	23,3	3,3	3,4	–20,0 п.п.
Удельный вес организаций, осуществляющих технологические инновации, %	7,2	7,4	5,4	5,1 ²	–2,3 п.п.
Выдано патентов, ед.	670	790	695	685	–13,3 %
Число используемых передовых технологий, тыс. ед.	6,3	8,5	9,1	9,2	+8,2 %

Примечание: объемные показатели приведены в составе субъектов Российской Федерации в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 03.11.2018 № 632.

¹ Показатели приведены в сопоставимые цены 2018 г. через индекс потребительских цен.

² Ввиду отсутствия сопоставимой методики расчета показателя данные приведены за 2017 г.

Более чем на 13 % выросли затраты на технологические инновации, однако это в большей степени связано с этапностью реализации шельфовых проектов Сахалинской области и работой авиа- и судостроительных предприятий Хабаровского края.

По такому результирующему показателю научной деятельности, как выдача патентов, значение по Дальнему Востоку снизилось. Сократился удельный вес организаций, осуществляющих технологические инновации, на 2,3 п.п. Наибольшие значения этого показателя приходились на северные субъекты Дальнего Востока, имеющие выраженную сырьевую специализацию: Чукотский автономный округ, Магаданскую область, Республику Саха

(Якутия), Камчатский край. То есть в наиболее выигрышном положении находятся те субъекты, которые имеют востребованные на внешнем рынке сырьевые товары. С другой стороны, добыча ресурсов в сложных природно-климатических условиях требует применения новых технологий, что также способствует развитию научно-технической базы.

Таким образом, можно предположить, что за четыре года механизм ТОСЭР не обеспечил интенсификацию инновационных процессов на Дальнем Востоке, отражаемых положительным изменением приведенных статистических показателей. Кроме того, ряд проведенных исследований показал, что механизм ТОСЭР в соизмерении с объективными факторами удорожания производства на Дальнем Востоке в действующем формате не обеспечит конкурентоспособность региональной продукции и не сможет стать полноценным драйвером инновационного развития макрорегиона [4].

Методика

Поскольку существующие в настоящее время статистические данные отражают лишь отдельные стороны инновационного потенциала территорий, для ведения мониторинга необходимы комплексная оценка, сведение к какому-то единому показателю. В связи с этим применена методика расчета интегрального показателя научного и инновационного развития дальневосточных регионов Российской Федерации.

Анализ основывается на вычислении интегральных коэффициентов в результате сравнения специально выбранных для целей исследования показателей [5].

При проведении анализа необходимо руководствоваться следующими методологическими принципами:

- отсутствие мультиколлинеарности (линейной зависимости) у факторов оценки;
- использование для расчета значений показателей, приведенных в сопоставимый вид (например, на 1 тыс. населения);
- лучшее значение показателя в периоде принимается за единицу, остальные рассчитываются как часть от него;
- результаты по каждому фактору и субъекту сводятся в интегральную оценку, получение итоговой оценки факторов в периоде по каждому субъекту производится путем их суммирования.

Проводятся расчет частных индексов и интегральная оценка по каждому федеральному округу и субъекту Дальневосточного федерального округа (ДФО). Лучший показатель в году среди них принимался за единицу, а остальные брались как часть от него по формуле:

$$t_{ij\beta} = \frac{X_{ij\beta}}{\max x_{i\beta}},$$

где:

$t_{ij\beta}$ – частный индекс показателя i по объекту исследования j в году β ;

$X_{ij\beta}$ – фактическое значение i показателя по объекту исследования j в году β ;

$\max x_{i\beta}$ – лучший показатель i среди объектов исследования в году β .

Путем сложения всех индексов по каждому объекту исследования определяется интегральная оценка:

$$T_{j\beta} = \sum_{i=1}^n t_{ij\beta},$$

где:

$T_{j\beta}$ – интегральная оценка по объекту исследования j в году β ;

$t_{ij\beta}$ – частный индекс показателя i по объекту исследования j в году β ;

$i = 1, 2, \dots, n$ – количество показателей.

В разработку были отобраны и включены 12 показателей, характеризующих научный и инновационный потенциал федеральных округов и субъектов Российской Федерации и отвечающих методологическим принципам. Они сведены в 4 блока:

1) общеэкономические показатели, характеризующие базовый потенциал территории для развития инноваций. Блок включает показатели производительности труда, инвестиционной отдачи и индекс промышленного производства;

2) инновационный потенциал характеризует вовлеченность предприятий и организаций в ведение инновационной деятельности (доля предприятий и организаций, выполняющих исследования и разработки, в общем количестве предприятий и организаций на территории федерального округа/субъекта Российской Федерации), а также вовлеченность населения в инновационные практики, в том числе молодежи (численность работников, выполнявших научные исследования и разработки, на 1 тыс. занятых в экономике; доля исследователей в возрасте до 39 лет в общей численности российских исследователей);

3) финансовое обеспечение инноваций (доля внутренних текущих затрат на научные исследования и разработки, не относящихся к оплате труда и страховым взносам, доля затрат на технологические инновации от общего объема отгруженных товаров, выполненных работ, услуг; доля внутренних затрат на исследования и разработки, в процентах к валовому региональному продукту);

4) результаты инновационной деятельности (коэффициент изобретательской активности; удельный вес инновационных товаров, работ, услуг в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг; количество используемых передовых производственных технологий в расчете на 100 предприятий и организаций).

Оцениваемые этими показателями факторы оказывают как прямое, так и косвенное воздействие на инновационные процессы.

Проводились два расчета. В первом состоянии научного и инновационного потенциала оценивалось между федеральными округами, определялось место Дальневосточного федерального округа среди них, а также в сравнении со среднероссийскими значениями. Во втором — анализ проводился среди дальневосточных субъектов. Период оценки: 2010—2018 гг.

Результаты

Среди федеральных округов Российской Федерации ДФО в 2018 г. находился на шестом месте по уровню научного и инновационного потенциала, опережая Южный и Северо-Кавказский федеральные округа (рис. 1). Кроме того, интегральная оценка Дальнего Востока ниже среднероссийской практически на 23 %. На протяжении анализируемого периода позиция Дальнего Востока не изменилась, но отставание от среднего по стране показателя усилилось.

Выше среднероссийских значений показатели только у двух федеральных округов: у Центрального, занимающего на протяжении всего анализируемого периода лидирующую позицию, и у Приволжского, который в последние годы наращивал свой потенциал.

В разрезе групп показателей наилучшие позиции Дальний Восток занимает по финансовому обеспечению инноваций — пятое место в 2018 г. из 8 федеральных округов (в 2010 г. — четвертое место) (рис. 2). Это обеспечивается в первую очередь за счет высоких значений по показателю доли затрат на технологические инновации в отгруженных товарах, на которые повлияли нефтегазовый сектор Сахалинской области и авиа- и судостроение Хабаровского края.

Дальневосточный федеральный округ является аутсайдером по инновационному потенциалу за счет низкой вовлеченности населения в научные и инновационные практики.

Результаты интегральной оценки по федеральным округам подтверждают тезис, что научный и инновационный потенциал сосредоточен на западных территориях России.

В разрезе субъектов Дальневосточного федерального округа лидером является Хабаровский край, где сосредоточено производство промышленной продукции военного и гражданского назначения (рис. 3). На втором месте — Приморский край, где помимо производства расположены основные научные центры регионального отделения Российской академии наук, фе-

деральный университет. Однако динамика субъектов неустойчива, ни один из них не достигает по развитию научного и инновационного потенциала среднероссийского уровня. Значения ниже средних по стране на 23,7 и 24,6 % в Хабаровском и Приморском краях соответственно.

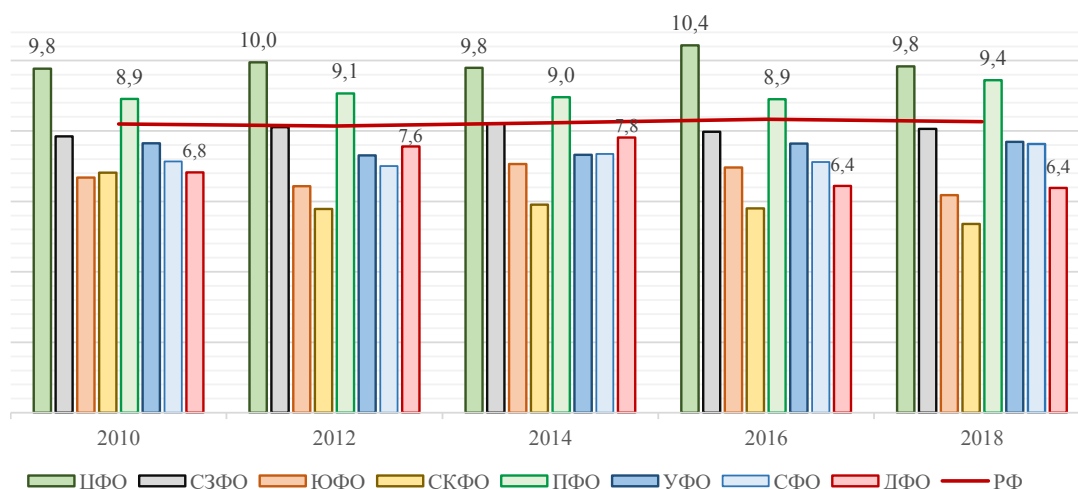


Рис. 1. Сравнительная оценка научного и инновационного потенциала федеральных округов Российской Федерации, баллы

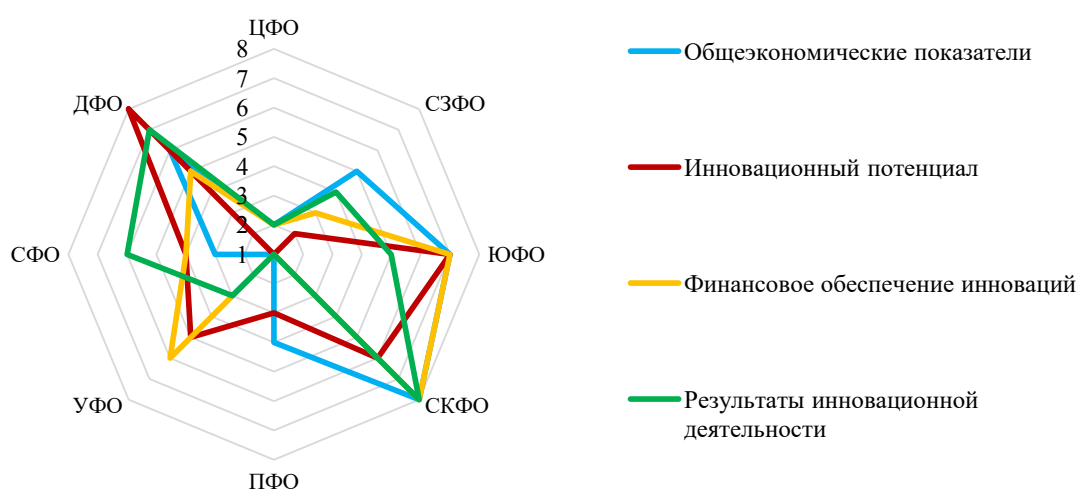


Рис. 2. Позиции Дальневосточного федерального округа по блокам показателей научного и инновационного потенциала в сравнении с федеральными округами Российской Федерации в 2018 г., место

В разрезе анализируемых групп лидирующие позиции по общеэкономическим показателям занимают северные субъекты, получающие ренту по природным ресурсам и показывающие высокую экономическую эффективность (рис. 4). Замыкающие позиции Амурской области объясняются низкими значениями показателя инвестиционной отдачи, что связано с реализацией масштабных проектов по строительству космодрома, газоперерабатывающего завода и др., влияние которых на валовой региональный продукт будет получено в более долгосрочном периоде.

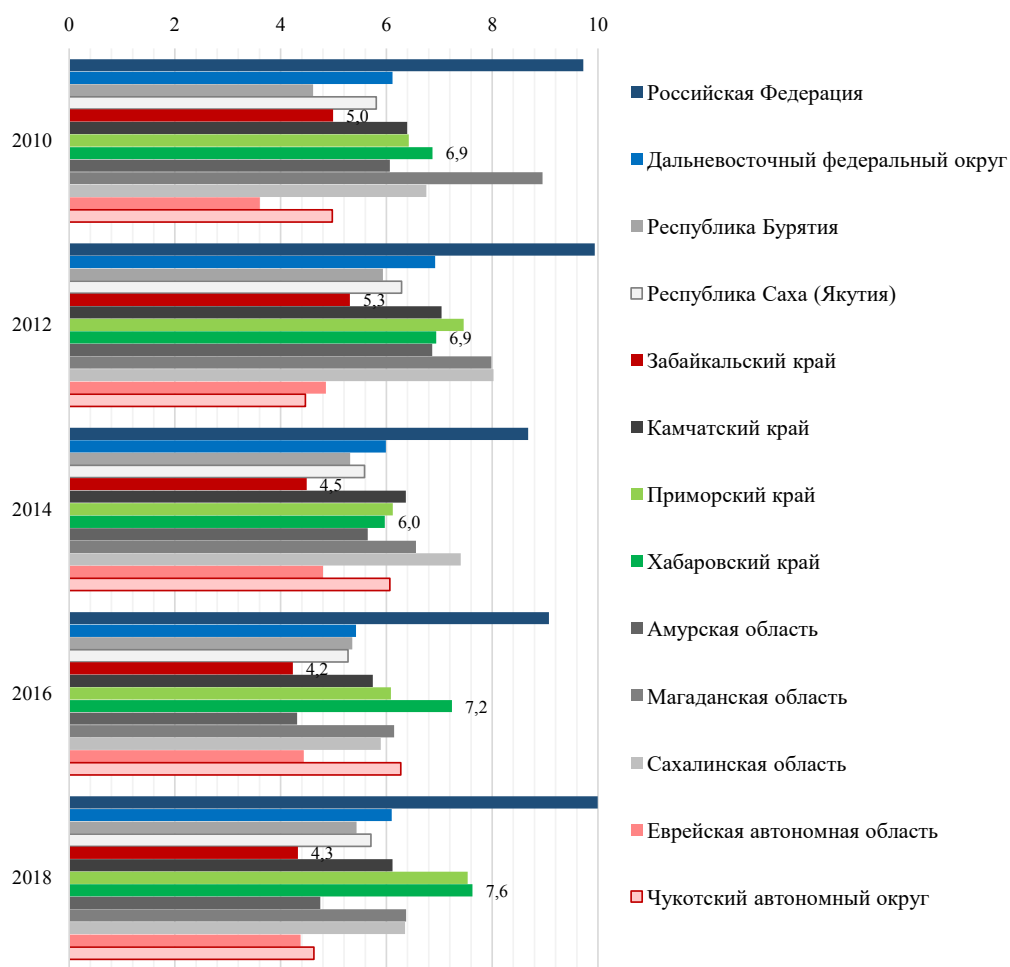


Рис. 3. Сравнительная оценка научного и инновационного потенциала субъектов Дальневосточного федерального округа, баллы



Рис. 4. Позиции субъектов Дальневосточного федерального округа по блоку общеэкономических показателей в 2018 г., место

По блоку показателей инновационного потенциала на первом месте среди субъектов Дальнего Востока — Магаданская область за счет ее лидирующих позиций по показателям кадрового потенциала (рис. 5). Это обусловлено расположением на территории области Северо-Восточного научного центра ДВО РАН, объединяющего научно-исследовательские институты и центры, а также эффектом малых чисел, когда даже при небольшом значении абсолютных показателей перевод в относительные дает высокий результат.

Замыкающий в группе — Чукотский автономный округ, что связано с нулевыми значениями показателей кадровой обеспеченности научных исследований и разработок. Также в аут-сайдерах — Еврейская автономная область и Забайкальский край.



Рис. 5. Позиции субъектов Дальневосточного федерального округа по блоку показателей инновационного потенциала в 2018 г., место

Согласно интегральной оценке финансовое обеспечение инноваций лучше всего организовано в Приморском крае (рис. 6). Субъект лидирует по показателям доли внутренних текущих затрат на научные исследования и разработки, направляемых на развитие (приобретение оборудования, материалов и т. п.), а также по доле внутренних затрат на исследования и разработки к валовому региональному продукту.



Рис. 6. Позиции субъектов Дальневосточного федерального округа по блоку показателей финансового обеспечения инноваций в 2018 г., место



Рис. 7. Позиции субъектов Дальневосточного федерального округа по блоку показателей результативности инновационной деятельности в 2018 г., место

Тройка замыкающих субъектов, как и по инновационному потенциалу, — Чукотский автономный округ, Еврейская автономная область и Забайкальский край.

По блоку показателей, отражающих результаты инновационной деятельности, на первом месте — Хабаровский край. Это обеспечивается лидирующей позицией по доле инновационных товаров в общем объеме отгруженных — за счет высокой стоимости продукции авиационной и судостроительной отраслей, а также высоких позиций по коэффициенту изобретательской активности.

Заключение

Согласно суммарным значениям интегральной оценки лидерами по уровню развития научного и инновационного потенциала являются южные субъекты Дальнего Востока, сохранившие на своей территории высокотехнологичные производства. Это показывает, в том числе, что недостаточно использование лишь ренты по природным ресурсам с опорой на добывающие отрасли, — необходим поиск продуктов, содержащих ренту по интеллекту.

Вместе с тем статистические показатели дают наиболее общие представления о состоянии и тенденциях развития научного и инновационного потенциала территорий. Причины же многих из них кроются в глубинных процессах, которые можно выявить с помощью более детального анализа.

Таким образом, Дальневосточный федеральный округ, несмотря на реализуемые здесь мегапроекты и внедрение особых организационных механизмов, по потенциалу и уровню развития науки и инноваций уступает сибирским и западным территориям Российской Федерации, где наиболее сбалансированы высшая школа, наука, производства, сформирована инновационная инфраструктура, обеспечивающая взаимодействие элементов и участников инновационного процесса.

Среди субъектов Дальневосточного федерального округа научный и инновационный потенциал наиболее развит в южных регионах с диверсифицированной экономикой, где, несмотря на издержки рыночных преобразований, сохранены промышленно-инновационный потенциал, научные кадры, ведется финансирование научно-исследовательских работ.

В перспективе при правильном расставлении приоритетов государственной поддержки, восстановлении прикладной науки, формировании эффективной инновационной инфраструктуры, постоянном мониторинге происходящих процессов научно-техническое развитие Дальневосточного федерального округа получит устойчивую положительную динамику.

Статья выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания 2020 г. № 075-01394-20-02 по теме «Организационно-техническое обеспечение и сопровождение мероприятий по мониторингу инновационной инфраструктуры Российской Федерации».

Список литературы

1. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года: Распоряжение Правительства РФ от 17.11.2008 № 1662-р. URL: <https://www.garant.ru> (дата обращения: 11.09.2020).
2. Заусаев В.К., Халиуллина З.А. Мегaproекты в социально-экономическом развитии территории и решении геостратегических задач Дальнего Востока // ЭКО. 2011. № 1. С. 179–188.
3. О территориях опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации: Федеральный закон от 29.12.2014 № 473-ФЗ. URL: <https://www.garant.ru> (дата обращения: 11.09.2020).
4. Заусаев В.К., Бежина В.П., Кручак Н.А. Территории опережающего социально-экономического развития: реалии и возможности // Азиатско-Тихоокеанский регион: экономика, политика, право. 2017. Т. 19. № 11. С. 58–71.
5. Повышение эффективности организационно-экономических механизмов ускоренного социально-экономического развития Дальневосточного федерального округа: отчет о НИР / Дальневосточный науч.-иссл. инст. рынка; отв. исп. Н.А. Кручак. Хабаровск, 2016. С. 19.

References

1. *Kontseptsiya dolgosrochnogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2020 goda: Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 17.11.2008 No. 1662-r.* [The concept of long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period up to 2020: Order of the Government of the Russian Federation of November 17, 2008 No. 1662-r]. Available at: <https://www.garant.ru> (date of access: 11.09.2020).
2. Zausaev V.K., Khaliullina Z.A. (2011) *Megaproekty v sotsial'no-ekonomicheskom razvitii territorii i reshenii geostrategicheskikh zadach Dal'nego Vostoka* [Megaprojects in the socio-economic development of the territory and the solution of geostrategic problems of the Far East] *EKO* [ECO]. No. 1. P. 179–188.
3. *O territoriyakh operezhayushchego sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya v Rossiyskoy Federatsii: Federal'nyy zakon ot 29.12.2014 No. 473-FZ* [On the territories of advanced social and economic development in the Russian Federation: Federal Law of December 29, 2014 No. 473-FZ]. Available at: <https://www.garant.ru> (date of access: 11.09.2020).
4. Zausaev V.K., Bezgina V.P., Kruchak N.A. (2017) *Territorii operezhayushchego sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya: realii i vozmozhnosti* [Territories of advanced socio-economic development: realities and opportunities] *Aziatsko-Tikhookeanskiy region: ekonomika, politika, pravo* [Asia-Pacific region: economics, politics, law]. Vol. 19. No. 11. P. 58–71.
5. *Povyshenie effektivnosti organizatsionno-ekonomicheskikh mekhanizmov uskorenno sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Dal'nevostochnogo federal'nogo okruga: otchet o NIR. Otv. isp. N.A. Kruchak* [Increasing the efficiency of organizational and economic mechanisms for accelerated socio-economic development of the Far Eastern Federal District: Report on R&D (2016) Responsible executor N.A. Kruchak] *Dal'nevostochnyy nauch.-issl. inst. rynka* [Far Eastern Market Research Institute]. Khabarovsk. P. 19.

DOI 10.35264/1996-2274-2020-2-20-39

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

И.А. Репина, гл. науч. сотр. Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, вед. спец. Научно-исследовательского вычислительного центра МГУ им. М.В. Ломоносова и Московского центра фундаментальной и прикладной математики, д-р физ.-мат. наук, проф., repina@ifaran.ru

М.И. Варенцов, науч. сотр. Научно-исследовательского вычислительного центра МГУ им. М.В. Ломоносова, Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН и Московского центра фундаментальной и прикладной математики, канд. геогр. наук, mvar91@gmail.com

Д.Г. Чечин, вед. научн. сотр. Московского физико-технического института и Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, канд. физ.-мат. наук, chechin@ifaran.ru

А.Ю. Артамонов, мл. науч. сотр. Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, sailer@ifaran.ru

Н.Е. Бодунков, доцент Московского авиационного института, канд. техн. наук, boduncov63@hotmail.com

М.Ю. Калягин, ведущий инженер Московского авиационного института, mikalyagin@yandex.ru

Д.Н. Живоглозов, науч. сотр. Центральной аэрологической обсерватории, канд. техн. наук, dimazhiv@rambler.ru

А.М. Шевченко, ст. науч. сотр. Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, канд. физ.-мат. наук, shvch@itam.nsc.ru

А.И. Варенцов, магистрант географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, jdeadfox17@gmail.com

Н.Е. Куксова, магистрант географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, kuksova_97@mail.ru

В.М. Степаненко, зам. дир. Научно-исследовательского вычислительного центра МГУ имени М.В. Ломоносова и Московского центра фундаментальной и прикладной математики, д-р физ.-мат. наук, vstepanenkomeister@gmail.com

А.А. Шестакова, науч. сотр. Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, канд. геогр. наук, shestakova.aa.92@gmail.com

Рецензент: **И.Н. Якутов**

Статья посвящена различным аспектам использования беспилотных летательных аппаратов для исследования атмосферного пограничного слоя. Рассмотрены характеристики атмосферного пограничного слоя, измеряемые с помощью беспилотных летательных аппаратов. Представлены типы используемых аппаратов и измерительных систем. Даны характеристики измерительных систем на базе беспилотных летательных аппаратов самолетного и коптерного типов, разрабатываемых в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, и краткий обзор ряда измерительных кампаний. Рассмотрены перспективы использования беспилотных летательных аппаратов в метеорологии и физике атмосферы.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, атмосферный пограничный слой, профили метеовеличин, атмосферная турбулентность, атмосферное зондирование, метеорология, физика атмосферы, микроклимат, инверсия температуры.

APPLICATION OF UNMANNED AIRCRAFT FOR STUDYING OF THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

I.A. Repina, Chief Researcher, Institute of Atmospheric Physics named after A.M. Obukhov, RAS, Research Computing Centre of Moscow State University named after M.V. Lomonosov and the Moscow Centre for Fundamental and Applied Mathematics, Ph. D., Professor, *Repina@ifaran.ru*

M.I. Varentsov, Researcher, Research Computing Centre of Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Institute of Atmospheric Physics named after A.M. Obukhov, RAS and Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, Doctor of Geography, *mvar91@gmail.com*

D.G. Chechin, Leading Researcher, Moscow Institute of Physics and Technology and Institute of Atmospheric Physics named after A.M. Obukhov, RAS, Doctor of Physics and Mathematics, *chechin@ifaran.ru*

A.Yu. Artamonov, Junior Researcher, Institute of Atmospheric Physics named after A.M. Obukhov, RAS, *sailer@ifaran.ru*

N.E. Bodunkov, Assistant Professor, Moscow Aviation Institute, Doctor of Engineering, *boduncov63@hotmail.com*

M.Yu. Kalyagin, Leading Engineer Moscow Aviation Institute, *mukalyagin@yandex.ru*

D.N. Zhivoglotov, Researcher, Central Aerological Observatory, Doctor of Engineering, *dimazhiv@rambler.ru*

A.M. Shevchenko, Senior Researcher, Institute of Theoretical and Applied Mechanics named after S.A. Khristianovich, SB RAS, Doctor of Physics and Mathematics, *shevch@itam.nsc.ru*

A.I. Varentsov, Undergraduate Student, Moscow State University named after M.V. Lomonosov, *jdeadfox17@gmail.com*

N.E. Kuksova, Undergraduate Student, Moscow State University named after M.V. Lomonosov, *kuksova_97@mail.ru*

V.M. Stepanenko, Deputy Director Research Computing Centre of Moscow State University named after M.V. Lomonosov, and Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, Ph. D., *vstepanenkodeister@gmail.com*

A.A. Shestakova, Researcher, Institute of Atmospheric Physics named after A.M. Obukhov, RAS, Doctor of Geography, *shestakova.aa.92@gmail.com*

The article is devoted to various aspects of the use of unmanned aerial vehicles (UAV) for the study of the atmospheric boundary layer. The characteristics of the atmospheric boundary layer, measured using the UAV, are considered. The types of devices and measuring systems used are presented. The characteristics of measuring systems installed on a fixed-wing aircraft and copter UAVs developed in the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS (IAP RAS) are presented. A brief overview of a number of the IAP RAS measurement campaigns is given. The prospects of using UAV in meteorology and atmospheric physics are considered.

Keywords: unmanned aerial vehicles, atmospheric boundary layer, profiles of meteorological parameters, atmospheric turbulence, atmospheric physics, meteorology, atmospheric sounding, temperature inversions.

Введение

Информация о вертикальной структуре тропосферы и ее временной изменчивости на разных высотах важна для ряда задач — от безопасности авиационных полетов до прогноза опасных метеорологических явлений и разработки теорий физики атмосферного погранич-

ного слоя. При этом вертикальные профили метеорологических величин сильно изменчивы по времени при различных метеорологических явлениях, таких как шквалы, атмосферные фронты, интенсивные циркуляции в мезомасштабных конвективных системах. В результате многочисленных исследований были получены эмпирические обобщенные вертикальные профили подобия для метеорологических параметров в атмосферном пограничном слое и сглаживающие их функции [1], что позволило существенно продвинуться в понимании процессов в пограничном слое атмосферы и решить ряд прикладных задач. Но вопрос о структуре и динамике атмосферного пограничного слоя при условиях сильно устойчивой и неустойчивой стратификаций, при наличии атмосферных температурных инверсий, и особенно в условиях неоднородной поверхности, остается открытым. Это касается прибрежных и горных рельефов, ледовитых морей, городских ландшафтов, лесных территорий с неоднородной растительностью. Информация о профилях скорости ветра, температуры и влажности является важным сопровождением полевых исследований газового и аэрозольного состава атмосферы и неотъемлемой частью подспутниковых экспериментов, а также критически необходима для верификации и совершенствования численных моделей погоды и климата.

Стандартный способ измерения профилей метеопараметров в атмосфере — радиозондирование с использованием шаров [2, 3]. Недостатки этого метода — дороговизна (зонды являются приборами одноразового использования) и, как следствие, разреженность сети аэрологических наблюдений и низкое временное разрешение: на большинстве аэрологических станций зондирование производится в лучшем случае 2 раза в сутки. Для мониторинга состояния атмосферы используются многоуровневые контактные измерения на метеорологических мачтах различной высоты [4–8]. Но эти измерения имеют дискретный характер и охватывают лишь приземный слой высотой максимум несколько сотен метров. Кроме того, необходима точная взаимная калибровка используемых метеорологических датчиков. Перспективным решением задачи мониторинга вертикальной структуры атмосферы с высоким пространственным и временным разрешением является дистанционное зондирование (содары, лидары, радары, температурные и влажностные профилемеры) [9–14]. Но все дистанционные методы зондирования основаны на регистрации излучения в различных диапазонах длин волн и при восстановлении профилей приводят к ряду ограничений, а используемая аппаратура дорога и громоздка. Наиболее полную информацию о строении пограничного слоя атмосферы дают самолеты-лаборатории [15–18]. Но эти измерения — дорогостоящие, и далеко не всегда есть возможность проводить их в исследуемых условиях.

Новые возможности для метеорологических измерений в атмосферном пограничном слое открывает использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Существуют два основных типа БПЛА: самолеты и многороторные вертолеты (обычно создаваемые по схеме квадрокоптера или октокоптера, далее — мультикоптеры). Первые попытки использовать БПЛА для исследования атмосферных процессов были предприняты еще в 70-е гг. XX в. [19]. Дальнейшее развитие компьютерных технологий, уменьшение размера датчиков и другие технологические достижения вывели беспилотные самолеты «на передовую» экспериментальных метеорологических исследований [8, 20–25]. БПЛА разных типов представляют собой многообещающий инструмент для атмосферных измерений, а именно: для исследований вертикального или горизонтального распределения температуры, влажности, ветра, характеристик турбулентности и т. д.

Беспилотные летательные аппараты самолетного типа

В последнее десятилетие началось активное использование беспилотных летательных аппаратов самолетного типа (БПЛА СТ) в метеорологических исследованиях [7, 8, 20, 24, 26], в том числе в целях измерения температуры, влажности и скорости ветра на различных высотах. Такое применение особенно актуально в труднодоступных районах с разреженной сетью метеорологических и аэрологических наблюдений. Измерения вертикальных профилей метеовеличин с помощью БПЛА СТ проводились над морским льдом у побережья

Антарктиды [7, 27], а также над морским льдом в Ботническом заливе [8]. Это позволило получить данные об эволюции атмосферного пограничного слоя с высоким пространственно-временным разрешением. Для измерения профилей на БПЛА СТ используются датчики температуры, влажности и давления, аналогичные применяемым в радиозондах, но, в отличие от радиозондирования, датчики могут использоваться многократно. Средняя скорость ветра на различных высотах определяется по измерениям воздушной скорости с помощью обыкновенной трубки Пито и по измерениям скорости БПЛА СТ относительно Земли. Последняя определяется по данным приемника спутниковой навигационной системы, установленного на БПЛА СТ и являющегося частью системы автопилота. Такой способ измерения ветра возможен при подъеме/спуске БПЛА СТ по спирали или при совершении маневра типа «коробка». Пример такого БПЛА СТ с относительно недорогим комплексом полезной нагрузки – Small Unmanned Meteorological Observer (SUMO) [28], применявшийся для исследований пограничного слоя во многих полевых экспериментах.

Наиболее актуально применение БПЛА СТ для исследования турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя, в особенности над неоднородной подстилающей поверхностью. Для таких задач БПЛА СТ имеют существенные преимущества перед традиционными стационарными наблюдениями с помощью акустических анемометров, устанавливаемых на мачте. Для измерений турбулентных пульсаций трех компонент скорости ветра, температуры и влажности необходимо оснащение измерительного комплекса на борту БПЛА СТ малоинерционными датчиками. Соответствующие измерительные комплексы применяются на пилотируемых самолетах-лабораториях [29, 30]. Из-за ограничений по весу полезной нагрузки для использования на БПЛА необходима разработка легких малогабаритных аналогов этих измерительных комплексов.

Для высокочастотных измерений температуры воздуха наиболее часто применяются термометры сопротивления, чувствительным элементом которых является платиновая нить. Благодаря небольшой воздушной скорости БПЛА платиновая нить может быть непосредственно вынесена в воздушный поток, что уменьшает постоянную времени датчика [31]. Также на БПЛА применяются миниатюрные термопары, которые, как правило, имеют несколько большую постоянную времени, чем платиновые термометры сопротивления. Кроме того, для измерения пульсаций температуры нашли применение малоинерционные оптоволоконные датчики [32].

Малоинерционные измерения пульсаций влажности осуществляются с помощью оптических приборов, принцип измерения влажности в которых основан на поглощении оптического излучения молекулами водяного пара. К сожалению, такие приборы имеют сравнительно большие габариты и вес. Так, существуют примеры использования криптонового гигрометра КН20 производства Campbell Scientific на крупных БПЛА СТ. В облегченном корпусе гигрометр КН20 был установлен на беспилотный самолет Manta [33] и на беспилотный самолет Latitude Engineering HQ-60 [32]. Эти самолеты имеют вес 30–40 кг и могут нести до 5 кг полезной нагрузки. Среди миниатюрных и недорогих датчиков, установка которых возможна на БПЛА СТ с небольшой взлетной массой, наименьшую постоянную времени, насколько известно авторам, имеет емкостной датчик влажности P14 Rapid производства Innovative Sensor Technology (IST), время отклика которого составляет менее 1,5 с. Следующее поколение датчика IST P14 – Rapid 2 – имеет еще меньшую постоянную времени: примерно 0,5 с [URL: <https://www.ist-ag.com/en/news-events/news/smallest-humidity-sensor-ultra-fast-response-time-0> (дата обращения: 10.10.2020)]. Исходя из представлений о характерных масштабах турбулентных вихрей в пограничном слое, можно ожидать, что датчик влажности с постоянной времени менее 1,0 с позволит регистрировать пульсации влажности, связанные с наиболее крупными энергонесущими турбулентными вихрями.

Пульсации трех компонент скорости ветра восстанавливаются по измерениям модуля и направления воздушной скорости, а именно: углов атаки и скольжения, скорости и ориен-

тации (углы крена, тангажа и рысканья) самолета относительно Земли. Наиболее распространенный метод измерения модуля воздушной скорости и углов атаки и скольжения — использование многоканального приемника воздушных давлений (МПВД), устанавливаемого на выносе на носу самолета в невозмущенном потоке. Наибольшее распространение получили пятиточечные приемники воздушных давлений. Скорость и углы ориентации самолета относительно Земли измеряются с помощью инерциальной навигационной системы, измерения которой совмещаются с измерениями приемника спутниковой навигационной системы с использованием фильтра Калмана. Системы, совмещающие миниатюрный МПВД и инерциальную навигационную систему и подходящие для установки на БПЛА, предлагаются различными производителями, например Aeroprobe [URL: <http://www.aeroprobe.com/air-data-probe> (дата обращения: 10.10.2020)] или Aventech [URL: <https://aventech.com/products/arim310.html> (дата обращения: 09.10.2020)].

БПЛА СТ с комплексом полезной нагрузки, аналогичным описанному выше, применялся для исследования турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя во время перехода от ночного устойчивого пограничного слоя к дневному конвективному [34], а также для измерений трехмерного поля ветра и турбулентной кинетической энергии в районе проектируемого расположения ветроэнергетических установок [24], для расчета турбулентных потоков тепла и влаги над сушей и морской поверхностью [33].

В Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН совместно с Московским авиационным институтом был разработан БПЛА самолетного типа «Цимлянин» с вертикальным взлетом/посадкой для исследования средней и турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя (рис. 1). Основное назначение разработанного БПЛА — измерение турбулентных статистик трех компонент скорости ветра и температуры на различных высотах в пределах пограничного слоя, а также над неоднородной подстилающей поверхностью. Особый интерес представляет применение БПЛА для исследования перестройки турбулентности над резкими границами термических и динамических свойств подстилающей поверхности, такими как суша — вода, лес — поле, лед — вода и др.



Рис 1. Беспилотный летательный аппарат «Цимлянин» с вертикальными взлетом/посадкой с комплексом полезной нагрузки

Особенность разработанного БПЛА — возможность вертикальных взлета/посадки, которые происходят в так называемом коптерном режиме за счет работы четырех подъемных винтов. Во время полета в самолетном режиме работает только толкающий винт, а подъемные винты не вращаются и не создают возмущений потока в области расположения датчиков. Преимущество такой «гибридной» схемы заключается прежде всего в более мягком и контролируемом режиме взлета/посадки, что снижает вероятность повреждения полезной нагрузки. Размах крыла БПЛА составляет 2,4 м, взлетный вес — 8–9 кг, крейсерская скорость — 15–20 м/с, масса полезной нагрузки — до 1,5 кг, максимальная продолжительность полета — свыше 60 мин., рабочий диапазон высот — до 1,5 км. БПЛА оборудован автопилотом Pixhawk 4 и может выполнять полет по заранее заданному маршруту.

Блок полезной нагрузки включает:

- семиточечный приемник воздушных давлений, разработанный совместно с Институтом теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск);
- инерциальную навигационную систему Ellipse 2N производства SBG Systems;
- малоинерционный платиновый термометр сопротивления, изготовленный в сотрудничестве с Центральной аэрологической обсерваторией (г. Долгопрудный);
- датчик температуры и влажности Vaisala HMP110;
- емкостной датчик влажности IST P14 Rapid;
- ИК-датчик температуры подстилающей поверхности производства Melexis.

В основе системы опроса датчиков и регистрации показаний лежит использование одноплатного компьютера Raspberry Pi.

Тестовые полеты БПЛА «Цимлянин» и апробация комплекса полезной нагрузки в натуральных условиях были проведены во время полевого эксперимента ИФА им. А.М. Обухова РАН на базе Цимлянской научной станции в период 06–14.08.2020. Выбор времени и места тестовых полетов был обусловлен возможностью сравнения наблюдений с традиционными измерениями атмосферной турбулентности с использованием акустических анемометров, установленных на мачте на высотах 2; 10 и 30 м, а также с данными двух акустических локаторов — содаров, установленных вблизи мачты.

За время эксперимента было проведено 10 полетов, во время которых проверялась работоспособность различных элементов комплекса полезной нагрузки и уточнялись летные характеристики БПЛА. В результате полетов было продемонстрировано соответствие летных характеристик БПЛА расчетным. Первичный анализ данных измерений, полученных с помощью комплекса полезной нагрузки, продемонстрировал работоспособность системы и корректное функционирование всех датчиков и узлов системы опроса и регистрации.

На рис. 2а приведены вертикальные профили температуры воздуха, полученные по измерениям датчика Vaisala HMP110 и платинового термометра сопротивления во время подъема БПЛА «Цимлянин» по спирали. Траектория подъема до высоты 380 м показана на рис. 2б. Измерения проводились в хорошо перемешанном конвективном пограничном слое при достаточно сильном ветре, скорость которого составляла примерно 8 м/с на высоте 30 м. Видно, что измеренные профили близки к сухой адиабате, которая, как известно, наблюдается в средней части перемешанного пограничного слоя. Показания платиновой нити ближе к измерениям на высоте 2 и 10 м, полученным с помощью градиентной метеостанции Aanderaa. Различия между показаниями датчиков могут быть связаны с точностью калибровки, различной постоянной времени и различным коэффициентом восстановления температуры. Скачки на графике температуры связаны с режимом полета БПЛА. Из-за сильного ветра и большого радиуса кривизны поворота во время подъема по спирали воздушная скорость БПЛА менялась от 15 до 30 м/с, причем вираж с подветренной стороны спирали сопровождался потерей высоты. Изменение воздушной скорости (а также, возможно, углов атаки и скольжения) сказалось также и на показаниях температуры. Очевидно, что для

более надежного измерения профиля температуры необходимы задание большего радиуса окружности (радиус равен 125 м, см. рис. 2а), вокруг которой производится подъем по спирали, а также лабораторное определение зависимости коэффициента восстановления температуры от воздушной скорости и углов атаки и скольжения.

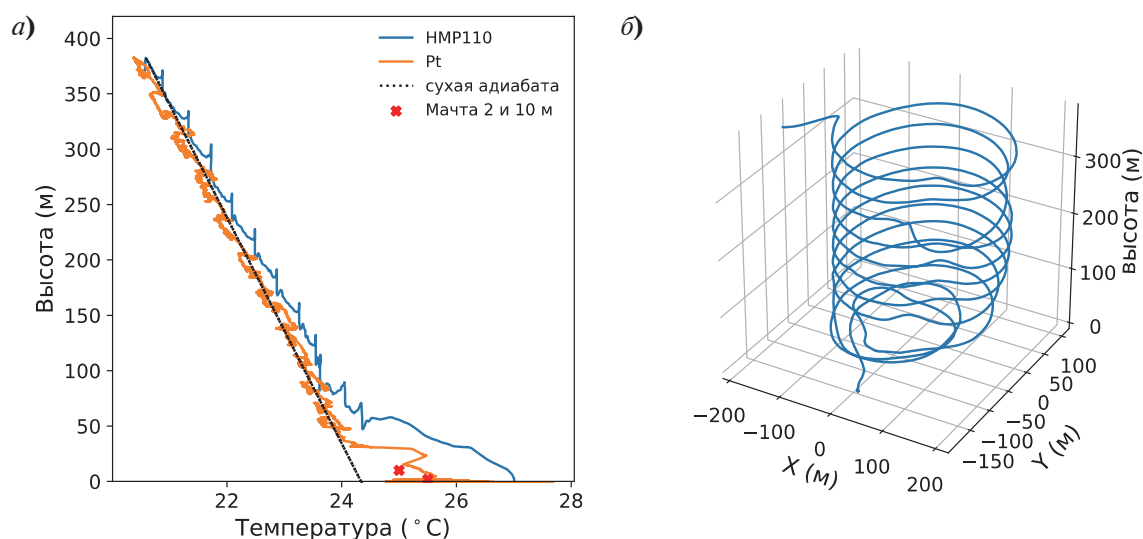


Рис. 2. Вертикальные профили температуры воздуха по данным измерений БПЛА «Цимлянин» с помощью платиновой нити (оранжевая кривая) и датчика HMP110 Vaisala (синяя кривая), красными символами «х» показаны измерения температуры на 2 и 10 м, полученные с помощью метеостанции Aanderaa (а); траектория полета БПЛА «Цимлянин» (б)

Беспилотные летательные аппараты мультикоптерного типа

Мультироторные беспилотные летательные аппараты, или мультикоптеры, стали активно развиваться значительно позже БПЛА самолетного типа, но в настоящее время являются более массовыми и популярными устройствами, нашедшими применение при решении самых разных задач. Их ключевые преимущества – простота управления, маневренность, возможность взлетать и садиться в условиях ограниченного пространства, зависать или двигаться вертикально над заданной точкой. Недостатки мультикоптеров – относительно малое время полета (обычно не более 30 мин. на одной батарее) и соответствующие ограничения по дальности и высоте полета.

Последние разработки в области программного и аппаратного обеспечения для мультикоптеров позволили значительно повысить надежность и удобство их использования. Современные мультикоптеры стали массовыми устройствами, которыми могут легко управлять пользователи без специальных навыков пилотирования. В настоящее время мультикоптеры широко используются в различных целях, включая фото- и видеосъемку, картографию и различные задачи мониторинга. Они используются в исследовании сельскохозяйственных угодий [35, 36], лесных ландшафтов [37], для создания цифровых моделей рельефа высокого разрешения [38, 39], для оценок глубины снега [40] и для мониторинга и картирования температуры поверхности Земли и водных объектов с использованием инфракрасных фотокамер и радиометров [35, 41–43]. Растет и число исследований, посвященных применению мультироторных БПЛА для атмосферных исследований. Показана перспективность их применения в полевых экспериментальных кампаниях для мониторинга вертикальной структуры пограничного слоя атмосферы, в том числе в суровых условиях Арктики и Антарктики [7, 8, 23, 25, 44].

Важное преимущество мультикоптеров для метеорологических измерений — возможность получения оценки скорости ветра без использования дополнительных внешних датчиков, только лишь по данным полетного контроллера. Получение такой оценки скорости и направления ветра возможно благодаря особенностям принципов движения квадрокоптера. Движение квадрокоптера в горизонтальном направлении осуществляется с помощью перераспределения мощности двигателей для изменения крена и тангажа воздушного судна и, соответственно, отклонения вектора тяги в нужную сторону. Используя данные навигационной системы — GPS-приемника, компаса, гироскопов и акселерометров, бортовой компьютер обеспечивает удержание заданной пилотом точки или скорости относительно Земли, компенсируя при этом влияние ветра. Соответственно, скорость и направление ветра могут быть восстановлены по показаниям датчиков навигационной системы БПЛА [45, 46].

В большинстве работ по применению мультикоптеров для атмосферных исследований используются БПЛА, не произведенные промышленно, а собранные из отдельных компонентов. Это могут быть как достаточно простые модели, собранные из стандартных комплектующих, на которые прикреплены метеорологические датчики, так и более сложные системы, разработанные с учетом специфики задачи проведения атмосферных измерений. Например, научной группой из университета Оклахомы (США) разработана модель CopterSonde для задач вертикального зондирования нижней атмосферы [47]. Датчики температуры и влажности расположены в специальном отсеке корпуса, где обеспечиваются их затенение и аспирация (обдув) с постоянной скоростью, а система сбора данных с датчиков интегрирована с полетным контроллером и автопилотом. Это позволяет дрону автоматически замедлять скорость при увеличении вертикального градиента температуры, чтобы получить более аккуратные измерения в зоне резких градиентов, а также держать курс в зависимости от направления ветра. Другой пример подобной разработки — модель MeteoDrone, разрабатываемая и выпускаемая швейцарской компанией MeteoMatics (рис. 3).



Рис. 3. Фотографии моделей MeteoDrone (а) и CopterSonde (б), разработанных для атмосферных измерений в Швейцарии и США

Источники: <https://www.meteomatics.com/>; [47]

Использование специализированных решений требует либо существенных трудозатрат на разработку подобной системы, либо крупных финансовых затрат на приобретение коммерческого продукта. Так, стоимость модели MeteoDrone составляет десятки тысяч евро. Альтернативный вариант — более простые и недорогие системы измерений, созданные на базе коммерческих мультикоптеров массового производства. Одна из групп, развивающих

технологии применения подобных средств измерений в России, — коллектив ученых из Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН и МГУ им. М.В. Ломоносова. С 2017 г. эта группа работает над развитием методики метеорологических измерений в пограничном слое атмосферы с использованием относительно недорогих коммерческих квадрокоптеров DJI Phantom 4 и датчиков производства американской компании International Met Systems. За последние годы научной группой получен большой опыт применения таких квадрокоптеров для атмосферных измерений в различных условиях и для различных научных задач.

Квадрокоптер DJI Phantom 4 Pro — популярная модель, предназначенная для фото/видео-съемки. Она имеет относительно невысокую стоимость и хорошие летные качества, а также проста в управлении. Максимальная высота полета составляет 500 м, горизонтальный диапазон ограничен 1–2 км, время полета на одной батарее составляет около 25 минут. Для измерения метеорологических параметров эти квадрокоптеры были оборудованы метеорологическими датчиками производства американской компании International Met Systems [URL: <http://www.intermetsystems.com> (дата обращения: 10.10.2020)] — iMet-XF и iMet-XQ2. Модульная измерительная система iMet-XF включает центральную плату с датчиком атмосферного давления и набор внешних датчиков — датчик температуры и влажности воздуха EE03, термистор NTC (Negative Temperature Coefficient), инфракрасный датчик яркостной температуры поверхности и приемник GPS. Основные компоненты системы (центральная плата, устройство записи данных и элемент питания) смонтированы в пластиковом боксе, установленном на шасси квадрокоптера, внешние датчики температуры и влажности установлены на пластиковом выносе под правым передним пропеллером. Система iMet-XQ2 — устройство, включающее датчики атмосферного давления, температуры, влажности, GPS-приемник, устройство записи данных и элемент питания, собранные в компактном корпусе. Опыт применения этих систем показал, что наиболее удобный способ их установки — на шасси квадрокоптера, с выносом датчиков под передний пропеллер для их наилучшей аспирации (рис. 4). Для восстановления скорости ветра используются записи полетного контроллера квадрокоптера (flight logs), доступные для скачивания через ПО DJI Assistant и конвертации в текстовый формат в ПО CsvView [URL: <http://datfile.net/CsvView/downloads.html> (дата обращения: 10.10.2020)]. Для обработки и анализа данных измерений разработан пакет программ, описанный более подробно в публикациях [23, 25].



Рис. 4. Фотография квадрокоптеров, оборудованных измерительными системами iMet-XF и iMet-XQ2. Фото А.И. Варенцова

Оснащенные таким образом измерительные системы могут быть использованы для решения широкого ряда научных задач. Первая, наиболее очевидная задача — получение вертикальных профилей метеорологических величин в нижней тропосфере. Квадрокоптер, оборудованный метеорологическими датчиками, позволяет получать синхронно измеренные, т. е. согласованные друг с другом, вертикальные профили температуры, влажности, скорости и направления ветра.

На рис. 5 показан пример вертикальных профилей температуры, влажности, скорости и направления ветра, измеренных с использованием квадрокоптера в береговой зоне Белого моря (п-ов Киндо, Беломорская биологическая станция МГУ) в зимний период, когда в условиях ясной погоды сформировалась мощная температурная инверсия в нижнем 350-метровом слое. Температурную инверсию также зафиксировал микроволновый радиометр для дистанционного зондирования профиля температуры — профилемер МТП-5 [14]. Но измерения с использованием квадрокоптера позволили получить представление о сложной неоднородной структуре вертикальных профилей других метеорологических величин, в том числе об усилении скорости ветра над слоем максимальных градиентов температуры и о резком повороте ветра в нижнем 100-метровом слое.

Естественно, возникает вопрос о точности и надежности данных, получаемых с использованием измерений на базе квадрокоптеров, а также о погрешностях, связанных с создаваемыми винтами квадрокоптера возмущениями атмосферы. Для верификации методики вертикального зондирования авторами проведена большая серия экспериментов, в том числе сравнение с данными высотной метеорологической мачты в Обнинске, с различными видами данных дистанционного зондирования и с данными высокочастотных измерений акустических анемометров. Все эти эксперименты показали, что результаты измерений с использованием квадрокоптеров объективно отражают реальные условия. Это демонстрируют примеры сравнения измерений с использованием квадрокоптера по температуре с данными высотной метеорологической мачты в Обнинске (рис. 6а) и с данными профилемера МТП-5 (см. рис. 6б) для условий неустойчивой стратификации атмосферы весной и летом соответственно. При этом для условий устойчивой стратификации с интенсивными приземными инверсиями метод измерений с использованием квадрокоптера оказывается во многом выигрышнее методов дистанционного зондирования, так как значительно детальнее разрешает резкие приземные градиенты температуры (см. рис. 6в).

В настоящее время ведется активная работа по проверке и калибровке метода измерения скорости ветра с использованием квадрокоптеров. Первые результаты показывают хорошее согласие с другими видами наблюдений, например с данными акустического (содарного) зондирования по части вертикального распределения скорости ветра (см. рис. 6г), а также по части временной изменчивости ветра (для колебаний с периодом в первые десятки секунд и более) при сравнении с данными акустического анемометра IRGASON, рядом с которым квадрокоптеры зависали для интеркалибровки (рис. 7).

Способность мультироторных БПЛА зависать в заданной точке или двигаться строго вертикально открывает возможности для их использования в целях исследования атмосферных процессов над неоднородными ландшафтами. Примеры территорий с четко выраженной неоднородностью: границы морского льда и незамерзающих полыней, между лесом и полем или же границы между застроенной территорией и окружающими естественными ландшафтами. Понимание механизмов формирования микроклимата таких территорий и их взаимодействия с атмосферой важно для разработки параметризаций в численных моделях погоды и климата. Примеры на рис. 8 демонстрируют различия вертикальных профилей температуры, измеренных в двух соседних точках — над льдом и над незамерзающей полыней в проливе Большая Салма (на расстоянии около 500 м друг от друга), а также в центре г. Надыма и за чертой города (на расстоянии около 4 км). В обоих случаях хорошо видно, что положительная температурная аномалия (тепловой след полыни или же эффект городского острова

тепла) в условиях устойчивой стратификации атмосферы локализована в слое толщиной около 50 м, однако существенно меняет условия приземной стратификации атмосферы, что важно, например, в решении задач распространения загрязняющих примесей.

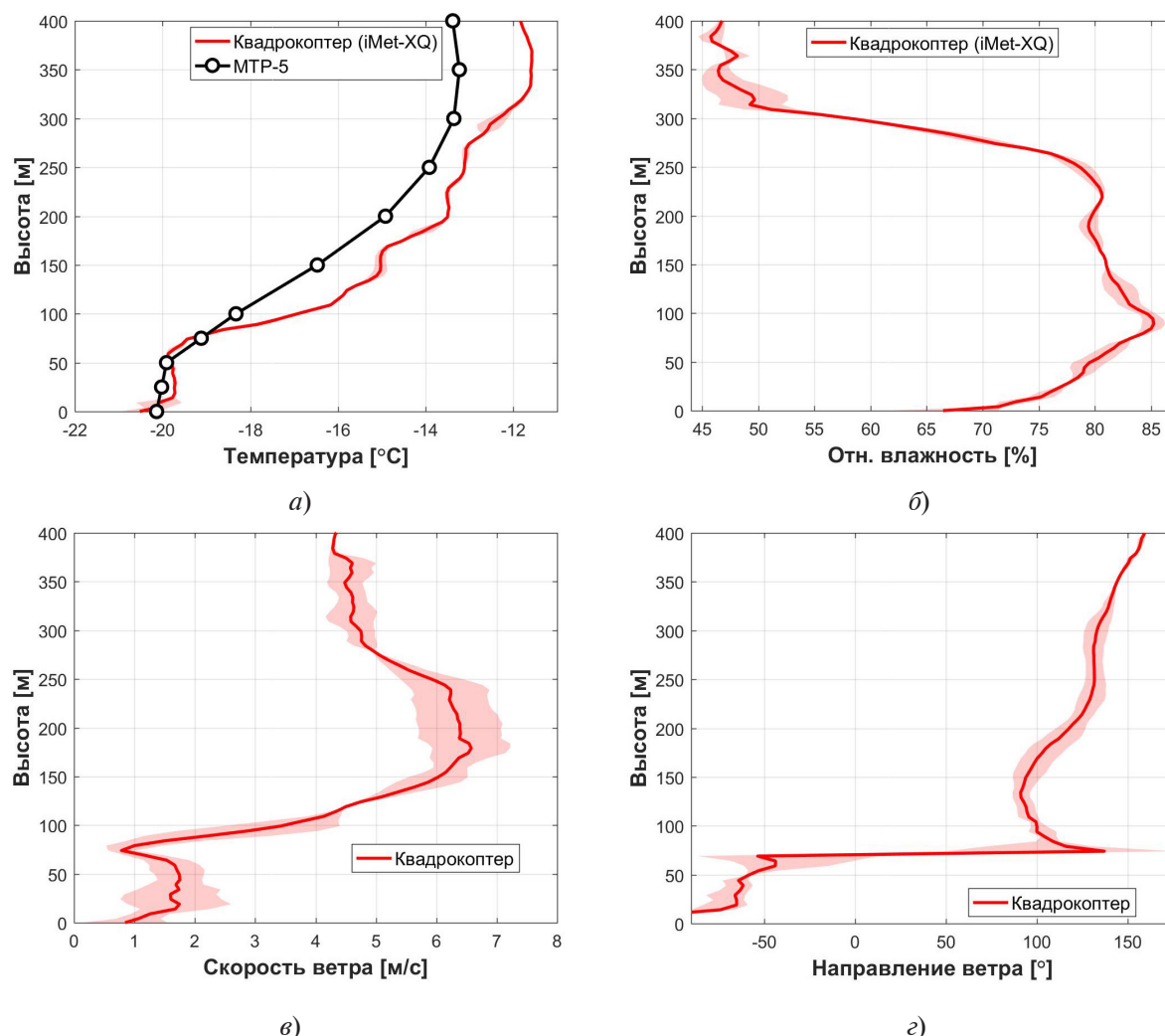


Рис. 5. Вертикальное распределение температуры (а), относительной влажности (б), скорости (в) и направления (г) ветра над прибрежной зоной Белого моря в районе Беломорской биологической станции МГУ 28.01.2020 в 13:30 по местному времени. Полупрозрачной заливкой показаны различия метеовеличин между восходящим и нисходящим сегментами полета, красной линией – среднее значение

В случае полярной аномалии температуры характеризует конвективный пограничный слой (КПС), формирование которого часто сопровождается развитием низкоуровневых облаков над полярной областью (рис. 9). Измерения с использованием квадрокоптера позволили получить не только вертикальные профили температуры и влажности над полярной областью и льдом, но также исследовать горизонтальное распределение и временную динамику этих величин внутри КПС [25]. Для этого квадрокоптер выполнял горизонтальные разрезы над льдом и полярной областью на различных высотах [48] или же зависал в фиксированной точке над полярной областью, выполняя роль «летающей метеостанции».

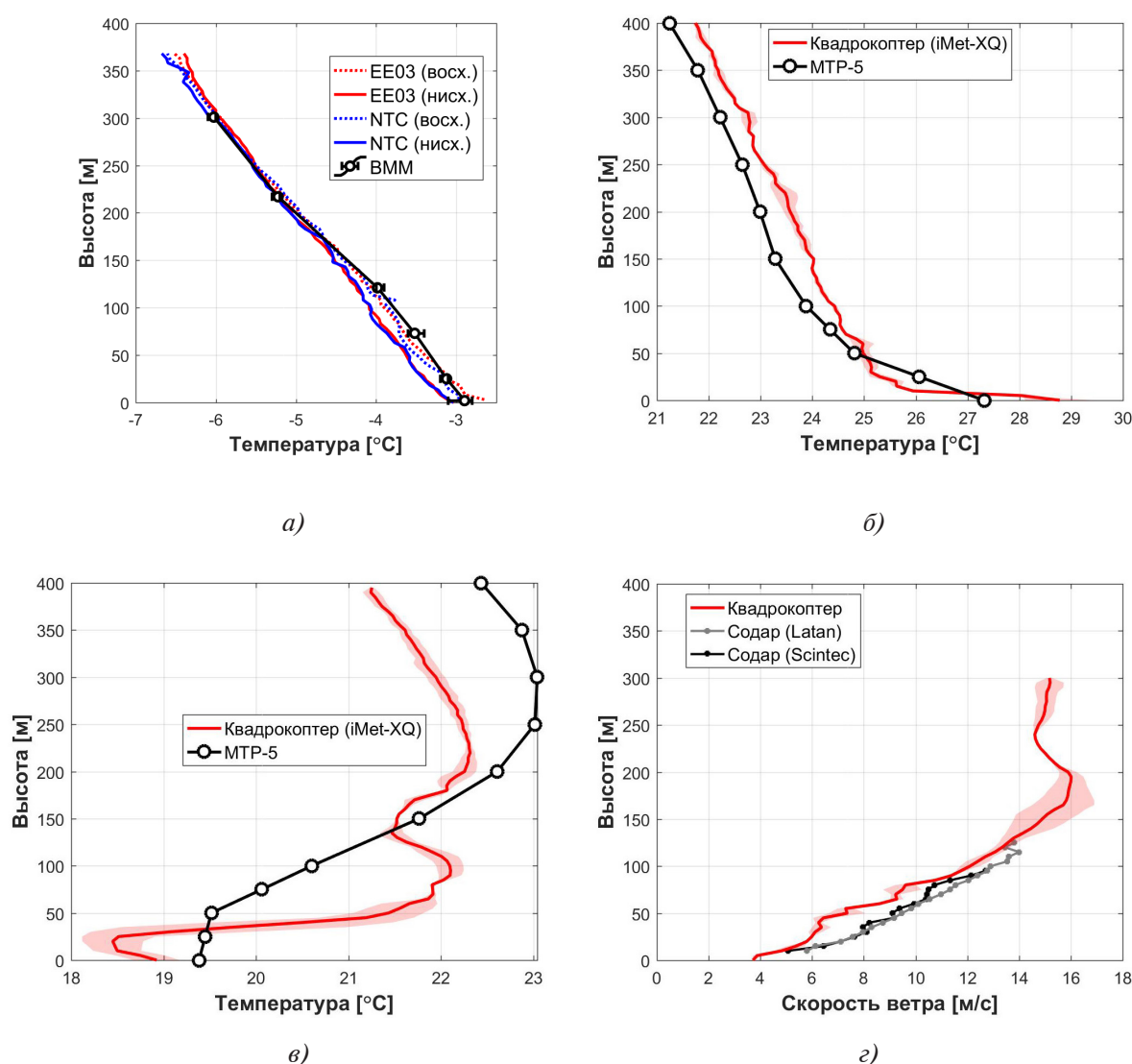


Рис. 6. Примеры сравнения вертикальных профилей температуры по данным зондирования с использованием квадрокоптера: с данными высотной метеорологической мачты в Обнинске 11.03.2018* (а); с данными профилимера МТП-5 над однородным степным ландшафтом в Цимлянске днем в 11:20 11.08.2020 (б) и в 06:30 10.08.2020 (в); сравнение восстановленной по данным квадрокоптера скорости ветра с измерениями двух акустических локаторов (содаров) в Цимлянске в 22:25 08.08.2020 (г)

* Примечание: отдельно показаны профили температуры, измеренные двумя датчиками на восходящем и нисходящем сегментах полета

Исследования показали, что даже в отсутствие облаков над полыньей развивается тонкий КПС толщиной 20–40 м. Полученные оценки толщины КПС согласуются с толщиной облачного слоя, формирующегося над полыньей в благоприятных условиях, с предыдущими оценками высоты КПС над той же самой полыньей [48] и с модельными исследованиями, которые предполагают высоту КПС около 50–100 м даже для полыньи шириной ≈ 1 км [49, 50]. КПС выделяется не только по значениям температуры и влажности, но по временной динамике этих величин: амплитуда их колебаний на масштабах нескольких десятков секунд над полыньей значительно превосходит соответствующие амплитуды надо льдом, что связано с формированием и перемещением внутри КПС отдельных турбулентных структур (термиков).

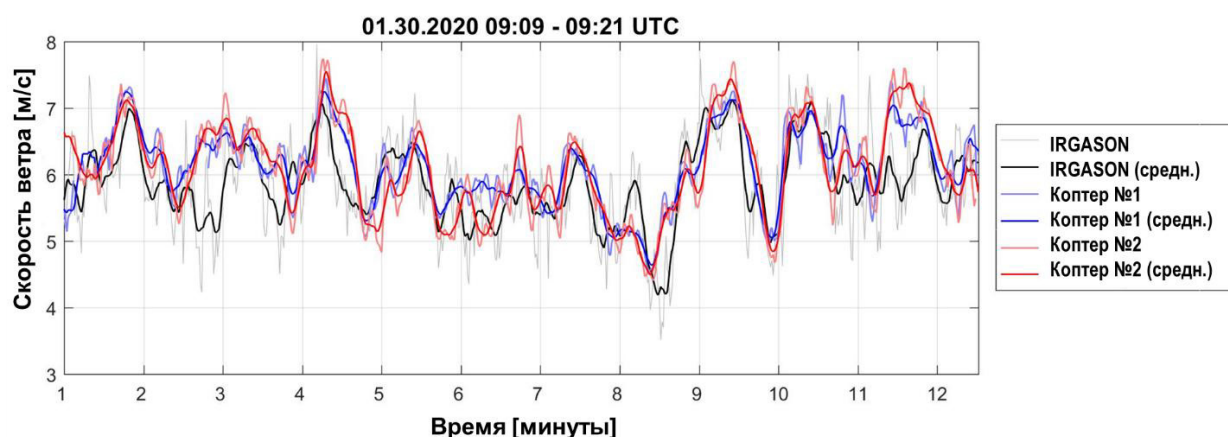


Рис. 7. Динамика скорости ветра по данным двух квадрокоптеров DJI Phantom 4 Pro (коптеры № 1 и № 2) по данным акустического анемометра IRGASON. Кривые на графиках показывают данные с дискретностью 1 с и бегущие средние с периодом 10 с

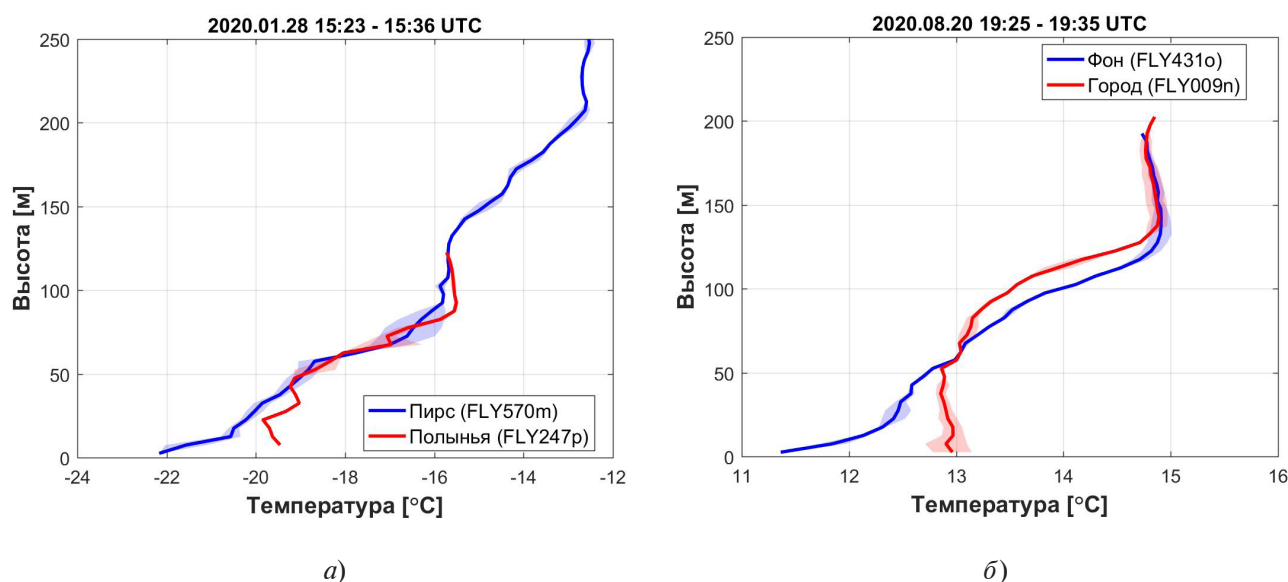


Рис. 8. Сравнение вертикальных профилей температуры: надо льдом (над пирсом) и над незамерзающей полыньей на Белом море 28.01.2020 в 18:30 по местному времени (а); над г. Надымом и над фоновой точкой за городом 21.08.2020 в 00:30 по местному времени (б)

Таким образом, проведенные эксперименты убедительно показали перспективность применения БПЛА для проведения контактных измерений структуры АПС над труднодоступными областями. Такой опыт открывает широкие возможности для новых экспериментальных кампаний, которые могли бы улучшить общее понимание атмосферных процессов над неоднородными ландшафтами, такими как лесные озера и поляны [51], полыньи [49, 52], урбанизированные территории, включая мегаполисы [53–55] и арктические города, где недавно были обнаружены характерные городские острова тепла, ярко выраженные в зимних условиях [56].



Рис. 9. Конвективный пограничный слой над полыней в прибрежной зоне Белого моря. Съемка с БПЛА

Заключение

Приведенные примеры показывают большие перспективы использования БПЛА различных типов для исследований структуры и динамики атмосферного пограничного слоя. Они могут применяться как для мониторинга, так и в краткосрочных измерительных кампаниях для оценки особенностей АПС в конкретных измерительных условиях. С помощью БПЛА возможно проведение измерений вертикальной и горизонтальной структуры АПС, в том числе и в труднодоступных местах над различными типами подстилающей поверхности. Возможно получение как средних характеристик состояния атмосферы, так и высокочастотных характеристик атмосферной турбулентности. Полученные результаты важны как для понимания физических причин исследуемых явлений, так и для разработки и валидации атмосферных моделей различного разрешения.

В рамках дальнейших исследований представляется перспективной разработка автоматизированных систем мониторинга атмосферы на основе БПЛА. Это позволит применять БПЛА не только в научных экспериментах, но и в решении задач оперативного мониторинга атмосферы в целях повышения точности и надежности прогнозов погоды.

Но при этом необходимо учитывать, что использование БПЛА для исследования АПС требует аккуратной обработки данных и учета ряда особенностей измеряемых величин. Требуется коррекция инерции датчиков, необходимо следить за расположением измерительных систем. В случае измерения профилей простая коррекция инерции, основанная на сдвиге временных рядов, значительно улучшает согласование между восходящими и нисходящими вертикальными профилями температуры и влажности, но этот способ может быть неэффективным в случае особенно резких температурных градиентов. Необходимо также учитывать влияние самого аппарата и его движения на характеристики измеряемых величин. Поэтому существует необходимость более детального теоретического понимания погрешности измерений, выполняемых на базе БПЛА, и разработки более сложных методов коррекции [57].

Разработка БПЛА «Цимлянин» и его натурные испытания в г. Цимлянске выполнены за счет гранта РНФ № 18-77-10072. Работы в прибрежных зонах выполнялись за счет гранта РФФИ № 20-05-00834. Эксперименты с использованием квадрокоптеров в г. Надыме выполнялись за счет грантов РФФИ №18-05-60126 и № 20-55-71004.

Список литературы

1. Kaimal J.C., Finnigan J.J. Atmospheric boundary layer flows, their structure and measurements. New York, Oxford: Oxford Univ. Press, 1994. P. 289.
2. Иванов В.Э., Фридзон М.Б., Ессяк С.П. Радиозондирование атмосферы // Екатеринбург, 2004. 596 с.
3. Sun B., Reale A., Seidel D.J., Hunt D.C. Comparing radiosonde and COSMIC atmospheric profile data to quantify differences among radiosonde types and the effects of imperfect collocation on comparison statistics // Journal of Geophysical Research. 2010. V. 115. P. 1–16.
4. Высотная метеорологическая мачта. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Научно-производственное объединение «Тайфун». 2020. URL: <http://typhoon-tower.obninsk.org/ru/index.html> (дата обращения: 09.10.2020).
5. Новицкий М.А., Мазурин Н.Ф., Кулижникова Л.К. и др. Сравнение данных измерений ветра при помощи выпускаемого промышленностью содара и высотной метеорологической мачты в Обнинске // Метеорология и гидрология. 2011. № 10. С. 74–83.
6. Peña A., Floors R., Sathe A., et al. Ten years of boundary-layer and wind-power meteorology at Høvsøre, Denmark // Boundary-Layer Meteorology. 2016. V. 158 (1). P. 1–26.
7. Jonassen M.O., Tisler P., Altstädter B., et al. Application of remotely piloted aircraft systems in observing the atmospheric boundary layer over Antarctic sea ice in winter // Polar Res. 2015. V. 34. P. 1–15.
8. Kral S., Reuder J., Vihma T., et al. Innovative Strategies for Observations in the Arctic Atmospheric Boundary Layer (ISOBAR) — The Hailuoto 2017 Campaign // Atmosphere. 2018. V. 9. № 7. P. 268.
9. Каллистратова М.А., Петенко И.В., Кузнецов Р.Д. и др. Содарное зондирование атмосферного пограничного слоя: Обзор работ ИФА им. А.М. Обухова РАН // Известия РАН. ФАО. 2018. Т. 54. № 3. С. 283–300.
10. Baker W.E., Atlas R., Cardinali C., et al. Lidar-measured wind profiles: the missing link in the global observing system // Bull Am Meteor Soc. 2014. V. 95. P. 543–564.
11. Zhou S.H., Wei M., Wang L.J., et al. Wind shear identification with the retrieved wind of Doppler weather radar // Journal of Tropical Meteorology. 2017. V. 23 (2).
12. Troitsky A.V., Gaykovich K.P., Kadyrov E.N., et al. Thermal sounding of the atmosphere boundary layer in oxygen absorption band center // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1993. V. 31. № 1. P. 116–120.
13. Westwater E.R., Han Y., Irisov V.G., et al. Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison Experiments // Journal of Atmospheric, and Oceanic Technology. July 1999. V. 16. P. 805–818.
14. Kadyrov E.N., Pick D.R. The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparisons within situ observations // Meteorol. Appl. 1998. V. 5. № 4. P. 393–404.
15. Hiyama T., Strunin M.A., Suzuki R., et al. Aircraft Observations of the Atmospheric Boundary Layer over a Heterogeneous Surface in Eastern Siberia // Hydrol. Proc., 2003. V. 17 (14). P. 2885–2911.
16. Strunin M.A., Hiyama T. Aircraft observations of the atmospheric boundary layer over the Lena river lowland: part 1. Mesoscale structure // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2005. T. 41. № 2. С. 156–177.
17. Strunin M.A., Hiyama T. Aircraft observations of the atmospheric boundary layer over the Lena river lowland: part 1. Spectral structure // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2005. T. 41. № 3. С. 342–360.
18. Strunin M.A., Hiyama T. Spectral structure of small-scale turbulent and mesoscale fluxes in the atmospheric boundary layer over a thermally inhomogeneous land surface // Boundary-Layer Meteorol. 2005. V. 117. P. 479–510.
19. Konrad T.G., Hill M.L., Rowland J.R., Meyer J.H. A Small, Radio-Controlled Aircraft as a Platform for Meteorological Sensors // APL Technical Digest. 1979. P. 11–19.

20. Boer G., Ivey M., Schmid B., et al. A bird's-eye view: Development of an operational ARM unmanned aerial capability for atmospheric research in arctic Alaska // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2018. V. 99 (6). P. 1197–1212.
21. Reuder J., Brisset P., Jonassen M., et al. The Small Unmanned Meteorological Observer SUMO: A new tool for atmospheric boundary layer research // *Meteorologische Zeitschrift*. 2009. V. 18 (2). P. 141–147.
22. Spiess T., Bange J., Buschmann M., Vörsmann P. First application of the meteorological Mini-UAV «M2AV» // *Meteorologische Zeitschrift*. 2007. V. 16 (2). P. 159–169.
23. Varentsov M.I., Yu Artamonov A., Pashkin A.D., Repina I.A. Experience in the quadcopter-based meteorological observations in the atmospheric boundary layer // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 231. P. 12053.
24. Wildmann N., Bernard S., Bange J. Measuring the local wind field at an escarpment using small remotely-piloted aircraft // *Renewable Energy*. 2017. V. 103. P. 613–619.
25. Варенцов М.И., Артамонов А.Ю., Пашкин А.Д., Репина И.А. Использование квадрокоптера для метеорологических измерений в пограничном слое атмосферы // *Турбулентность, динамика атмосферы и климата: сб. тр. М.: Физматкнига, 2018. С. 202–212.*
26. Elston J., Argrow B., Stachura M., et al. Overview of Small Fixed-Wing Unmanned Aircraft for Meteorological Sampling // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2015. V. 32. P. 97–115.
27. Cassano J.J., Seefeldt M.W., Palo S., et al. Observations of the atmosphere and surface state over Terra Nova Bay, Antarctica, using unmanned aerial systems // *Earth Syst. Sci. Data*. 2016. V. 8. P. 115–126.
28. Reuder J., Jonassen M.O., Ólafsson H. The Small Unmanned Meteorological Observer SUMO: Recent developments and applications of a micro-UAS for atmospheric boundary layer research // *Acta Geophys.* 2012. V. 60. P. 1454–1473.
29. Bange J., Esposito M., Lenschow D.H., et al. Measurement of aircraft state and thermodynamic and dynamic variables // In *Airborne Measurements for Environmental Research: Methods and Instruments*; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., KGaA: Weinheim, Germany, 2013. P. 7–75.
30. Lenschow D.H. Aircraft Measurements in the Boundary Layer // In *Probing the Atmospheric Boundary Layer*; Ed. Lenschow D.H.; American Meteorological Society: Boston, MA, USA, 1986. P. 39–53.
31. Wildmann N., Mauz M., Bange J. Two fast temperature sensors for probing of the atmospheric boundary layer using small remotely piloted aircraft (RPA) // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. V. 6. P. 2101–2113.
32. Zappa C.J., Brown S.M., Laxague N.J., et al. Using Ship-Deployed High-Endurance Unmanned Aerial Vehicles for the Study of Ocean Surface and Atmospheric Boundary Layer Processes // *Frontiers in Marine Science*. 2020. V. 6. P. 777.
33. Reineman B.D., Lenain L., Statom N.M., Melville W.K. Development and Testing of Instrumentation for UAV-Based Flux Measurements within Terrestrial and Marine Atmospheric Boundary Layers // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2013. V. 30. P. 1295–1319.
34. Wildmann N., Rau G.A., Bange J. Observations of the Early Morning Boundary-Layer Transition with Small Remotely-Piloted Aircraft // *Boundary-Layer Meteorol.* 2015. V. 157. P. 345.
35. Patel P.N., Patel M.A., Faldu R.M., Dave Y.R. Quadcopter for Agricultural Surveillance // *Adv. Electron. Electr. Eng.* 2013. V. 3. № 4. P. 427–432.
36. Roldán J.J., Joossen G., Sanz D., et al. Mini-UAV based sensory system for measuring environmental variables in greenhouses // *Sensors (Switzerland)*. 2015. V. 15. № 2. P. 3334–3350.
37. Денисов С.А., Домрачев А.А., Елсуков А.С. Опыт применения квадрокоптера для мониторинга возобновления леса // *Вестник Поволжского гос. технологич. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование*. 2016. Т. 32. № 4. С. 34–46.
38. Воскресенский И.С., Сучилин А.А., Ушакова Л.А. и др. Изучение морфологии оползня на основе данных ГНСС и воздушного зондирования (на примере участка долины р. Протва) // *Инженерные изыскания*. 2018. Т. 12. № 5–6. С. 50–57.
39. Ajayi O.G., Salubi A.A., Angbas A.F., Odigure M.G. Generation of accurate digital elevation models from UAV acquired low percentage overlapping images // *Int. J. Remote Sens.* 2017. V. 38. № 8–10. P. 3113–3134.

40. Cimoli E., Marcer M., Vandecrux B., at al. Application of Low-Cost UASs and Digital Photogrammetry for High-Resolution Snow Depth Mapping in the Arctic // *Remote Sens.* 2017. V. 9. № 11. P. 1144.
41. DeMario A., Lopez P., Plewka E., at al. Water Plume Temperature Measurements by an Unmanned Aerial System (UAS) // *Sensors.* 2017. V. 17. № 2. P. 306.
42. Li F., Yang W., Liu X., at all. Using high-resolution UAV-borne thermal infrared imagery to detect coal fires in Majiliang mine, Datong coalfield, Northern China // *Remote Sens. Lett.* 2018. V. 9. № 1. P. 71–80.
43. Nishar A., Richards S., Breen D., at all. Thermal infrared imaging of geothermal environments and by an unmanned aerial vehicle (UAV): A case study of the Wairakei – Tauhara geothermal field, Taupo, New Zealand // *Renew. Energy.* 2016. V. 86. P. 1256–1264.
44. Lampert A., Altstädter B., Bärffuss K., at all. Unmanned Aerial Systems for Investigating the Polar Atmospheric Boundary Layer — Technical Challenges and Examples of Applications. 2020. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos11040416> (дата обращения: 09.10.2020).
45. Neumann P.P., Bartholmai M. Real-time wind estimation on a micro unmanned aerial vehicle using its inertial measurement unit // *Sensors and Actuators, A: Physical.* 2015. V. 235. P. 300–310.
46. Palomaki R.T., Rose N.T., van den Bossche M., at all. Wind estimation in the lower atmosphere using multirotor aircraft // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.* 2017. V. 34(5). P. 1183–1191.
47. Segales A.R., Greene B.R., Bell T.M., at all. The CopterSonde : An Insight into the Development of a Smart UAS for Atmospheric Boundary Layer Research, (January), 2020. P. 1–21.
48. Степаненко В.М., Дебольский А.В., Варенцов М.И. и др. Изучение атмосферной конвекции над арктической полыньей с применением суперкомпьютерных вычислений и спутниковых данных высокого разрешения // *Земля из космоса: наиболее эффективные решения.* 2011. № 10. С. 52–55.
49. Esau I.N. Amplification of turbulent exchange over wide Arctic leads: Large-eddy simulation study // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. № D8. P. D08109.
50. Vihma T., Pirazzini R., Fer I., at all. Advances in understanding and parameterization of small-scale physical processes in the marine Arctic climate system: A review // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. № 17. P. 9403–9450.
51. Barskov K., Stepanenko V., Repina I., at all. Two Regimes of Turbulent Fluxes Above a Frozen Small Lake Surrounded by Forest // *Boundary-Layer Meteorology.* 2019. V. 173, No. 3. P. 311–320.
52. Burk S.D., Fett R.W., Englebreton R.E. Numerical simulation of cloud plumes emanating from Arctic leads // *J. Geophys. Res. Atmos.* 1997. V. 102. № D14. P. 16529–16544.
53. Варенцов М.И., Самсонов Т.Е., Кислов А.В., Константинов П.И. Воспроизведение острова тепла Московской агломерации в рамках региональной климатической модели COSMO-CLM // *Вестник Московского ун-та. Сер. 5: География.* 2017. № 6. С. 25–37.
54. Локощенко М.А., Корнева И.А., Кочин А.В. и др. О высотной протяженности городского «острова тепла» над Москвой // *Доклады Академии наук.* 2016. Т. 466. № 2. С. 213–217.
55. Chow W., Ho D. Investigating the vertical dimension of Singapore’s urban heat island through quadcopter platforms: an pilot study // *Geophysical Research Abstracts.* 2016. V. 5690.
56. Jacobi C., Scherf A., Siemer A.H., Roth R. On the influence of sensor inertia on the estimation of turbulent fluxes from aircraft measurements // *Boundary-Layer Meteorol.* 1995. V. 76. № 1–2. P. 97–108.

References

1. Kaimal J.C., Finnigan J.J. (1994) Atmospheric boundary layer flows, their structure and measurements. New York, Oxford: Oxford Univ. Press. P. 289.
2. Ivanov V.E., Fridzon M.B., Essyak S.P. (2004) *Radiozondirovanie atmosfery* [Radio sounding of the atmosphere]. Ekaterinburg. P. 596.
3. Sun B., Reale A., Seidel D.J., Hunt D.C. (2010) Comparing radiosonde and COSMIC atmospheric profile data to quantify differences among radiosonde types and the effects of imperfect collocation on comparison statistics. *Journal of Geophysical Research.* V. 115. P. 1–16.
4. *Vysotnaya meteorologicheskaya machta. Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy Nauchno-proizvodstvennoe ob"edinenie «Tayfun»* [High-altitude meteorological mast. Federal

Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring Research and Production Association «Typhoon»] (2020). Available at: <http://typhoon-tower.obninsk.org/ru/index.html> (date of access: 09.10.2020).

5. Novitsky M.A., Mazurin N.F., Kulizhnikova L.K. et al. (2011) *Sravnenie dannykh izmereniy vetra pri pomoshchi vypuskaemogo promyshlennost'yu sodara i vysotnoy meteorologicheskoy machty v Obninske* [Comparison of wind measurement data using an industry-produced sodar and a high-altitude meteorological mast in Obninsk] *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology]. No. 10. P. 74–83.

6. Peña A., Floors R., Sathe A., at all. (2016) Ten years of boundary-layer and wind-power meteorology at Høvsøre, Denmark. *Boundary-Layer Meteorology*. 2016. V. 158 (1). P. 1–26.

7. Jonassen M.O., Tisler P., Altstädter B., at all. (2015) Application of remotely piloted aircraft systems in observing the atmospheric boundary layer over Antarctic sea ice in winter. *Polar Res.* V. 34. P. 1–15.

8. Kral S., Reuder J., Vihma T., at all. (2018) Innovative Strategies for Observations in the Arctic Atmospheric Boundary Layer (ISOBAR) — The Hailuoto 2017 Campaign. *Atmosphere*. V. 9. No. 7. P. 268.

9. Kallistratova M.A., Petenko I.V., Kuznetsov R.D., etc. (2018) *Sodarnoe zondirovanie atmosfernogo pogrannichnogo sloya: Obzor rabot IFA im. A.M. Obukhova RAN* [Sodar sounding of the atmospheric boundary layer: a Review of the works of the Obukhov Institute of the Russian Academy of Sciences] *Izvestiya RAN FAO* [Izvestiya RAS. FAO]. Vol. 54. No. 3. P. 283–300.

10. Baker W.E., Atlas R., Cardinali C., at all. (2014) Lidar-measured wind profiles: the missing link in the global observing system. *Bull Am Meteor Soc.* V. 95. P. 543–564.

11. Zhou S.H., Wei M., Wang L.J., at all. (2017) Wind shear identification with the retrieved wind of Doppler weather radar. *Journal of Tropical Meteorology*. V. 23 (2).

12. Troitsky A.V., Gaykovich K.P., Kadygrov E.N., at all. (1993) Thermal sounding of the atmosphere boundary layer in oxygen absorption band center. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*. V. 31. No. 1. P. 116–120.

13. Westwater E.R., Han Y., Irisov V.G., at all. (1999) Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison Experiments. *Journal of Atmospheric, and Oceanic Technology*. July. V. 16. P. 805–818.

14. Kadygrov E.N., Pick D.R. (1998) The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparisons within situ observations. *Meteorol. Appl.* V. 5. No. 4. P. 393–404.

15. Hiyama T., Strunin M.A., Suzuki R., at all. (2003) Aircraft Observations of the Atmospheric Boundary Layer over a Heterogeneous Surface in Eastern Siberia. *Hydrol. Proc.* V. 17 (14). P. 2885–2911.

16. Strunin M.A., Hiyama T. (2005) Aircraft observations of the atmospheric boundary layer over the Lena river lowland: part 1. Mesoscale structure. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. T. 41. No. 2. C. 156–177.

17. Strunin M.A., Hiyama T. (2005) Aircraft observations of the atmospheric boundary layer over the Lena river lowland: part 1. Spectral structure. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. T. 41. No. 3. C. 342–360.

18. Strunin M.A., Hiyama T. (2005) Spectral structure of small-scale turbulent and mesoscale fluxes in the atmospheric boundary layer over a thermally inhomogeneous land surface. *Boundary-Layer Meteorol.* V. 117. P. 479–510.

19. Konrad T.G., Hill M.L., Rowland J.R., Meyer J.H. (1979) A Small, Radio-Controlled Aircraft as a Platform for Meteorological Sensors. *APL Technical Digest*. P. 11–19.

20. Boer G., Ivey M., Schmid B., at all. (2018) A bird's-eye view: Development of an operational ARM unmanned aerial capability for atmospheric research in arctic Alaska. *Bulletin of the American Meteorological Society*. V. 99 (6). P. 1197–1212.

21. Reuder J., Brisset P., Jonassen M., at all. (2009) The Small Unmanned Meteorological Observer SUMO: A new tool for atmospheric boundary layer research. *Meteorologische Zeitschrift*. V. 18 (2). P. 141–147.

22. Spiess T., Bange J., Buschmann M., Vörsmann P. (2007) First application of the meteorological Mini-UAV «M2AV». *Meteorologische Zeitschrift*. V. 16 (2). P. 159–169.

23. Varentsov M.I., Yu Artamonov A., Pashkin A.D., Repina I.A. (2019) Experience in the quadcopter-based meteorological observations in the atmospheric boundary layer. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. V. 231. P. 12053.

24. Wildmann N., Bernard S., Bange J. (2017) Measuring the local wind field at an escarpment using small remotely-piloted aircraft. *Renewable Energy*. V. 103. P. 613–619.
25. Varentsov M.I., Artamonov A.Yu., Pashkin A.D., Repina I.A. (2018) *Ispol'zovanie kvadrokoptera dlya meteorologicheskikh izmereniy v pogranichnom sloe atmosfery* [Use of a quadcopter for meteorological measurements in the atmospheric boundary layer] *Turbulentnost', dinamika atmosfery i klimata: sb. tr. Fizmatkniga* [Turbulence, dynamics of the atmosphere and climate: collection of articles. tr. Fizmatkniga]. Moscow. P. 202–212.
26. Elston J., Argrow B., Stachura M., at all. (2015) Overview of Small Fixed-Wing Unmanned Aircraft for Meteorological Sampling. *J. Atmos. Oceanic Technol.* V. 32. P. 97–115.
27. Cassano J.J., Seefeldt M.W., Palo S., at all. (2016) Observations of the atmosphere and surface state over Terra Nova Bay, Antarctica, using unmanned aerial systems. *Earth Syst. Sci. Data*. V. 8. P. 115–126.
28. Reuder J., Jonassen M.O., Ólafsson H. (2012) The Small Unmanned Meteorological Observer SUMO: Recent developments and applications of a micro-UAS for atmospheric boundary layer research. *Acta Geophys.* V. 60. P. 1454–1473.
29. Bange J., Esposito M., Lenschow D.H., at all. (2013) Measurement of aircraft state and thermodynamic and dynamic variables. In *Airborne Measurements for Environmental Research: Methods and Instruments*; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., KGaA: Weinheim, Germany. P. 7–75.
30. Lenschow D.H. (1986) Aircraft Measurements in the Boundary Layer. In *Probing the Atmospheric Boundary Layer*. Ed. Lenschow D.H. American Meteorological Society: Boston, MA, USA. P. 39–53.
31. Wildmann N., Mauz M., Bange J. (2013) Two fast temperature sensors for probing of the atmospheric boundary layer using small remotely piloted aircraft (RPA). *Atmos. Meas. Tech.* V. 6. P. 2101–2113.
32. Zappa C.J., Brown S.M., Laxague N.J., at all. (2020) Using Ship-Deployed High-Endurance Unmanned Aerial Vehicles for the Study of Ocean Surface and Atmospheric Boundary Layer Processes. *Frontiers in Marine Science*. V. 6. P. 777.
33. Reineman B.D., Lenain L., Statom N.M., Melville W.K. (2013) Development and Testing of Instrumentation for UAV-Based Flux Measurements within Terrestrial and Marine Atmospheric Boundary Layers. *J. Atmos. Oceanic Technol.* V. 30. P. 1295–1319.
34. Wildmann N., Rau G.A., Bange J. (2015) Observations of the Early Morning Boundary-Layer Transition with Small Remotely-Piloted Aircraft. *Boundary-Layer Meteorol.* V. 157. P. 345.
35. Patel P.N., Patel M.A., Faldu R.M., Dave Y.R. (2013) Quadcopter for Agricultural Surveillance. *Adv. Electron. Electr. Eng.* V. 3. No. 4. P. 427–432.
36. Roldán J.J., Joossen G., Sanz D., at all. (2015) Mini-UAV based sensory system for measuring environmental variables in greenhouses. *Sensors (Switzerland)*. V. 15. No. 2. P. 3334–3350.
37. Denisov S.A., Domrachev A.A., Elsukov A.S. (2016) *Opyt primeneniya kvadrokoptera dlya monitoringa vozobnovleniya lesa* [Experience in using a quadcopter to monitor forest regeneration] *Vestnik Povolzhskogo gos. tekhnologich. un-ta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State technological university: Forest. Ecology. Nature management]. T. 32. No. 4. P. 34–46.
38. Voskresensky I.S., Suchilin A.A., Ushakova L.A. et al. (2018) *Izuchenie morfologii opolznaya na osnove dannykh GNSS i vozdušnogo zondirovaniya (na primere uchastka doliny r. Protva)* [Study of the morphology of landslide on the basis of GNSS and airborne sounding data (on the example of a section of the Protva river valley)] *Inzhenernye izyskaniya* [Engineering research]. Vol. 12. No. 5–6. P. 50–57.
39. Ajayi O.G., Salubi A.A., Angbas A.F., Odigure M.G. (2017) Generation of accurate digital elevation models from UAV acquired low percentage overlapping images. *Int. J. Remote Sens.* V. 38. No. 8–10. P. 3113–3134.
40. Cimoli E., Marcer M., Vandecrux B., at al. (2017) Application of Low-Cost UASs and Digital Photogrammetry for High-Resolution Snow Depth Mapping in the Arctic. *Remote Sens.* V. 9. No. 11. P. 1144.
41. DeMario A., Lopez P., Plewka E., at al. (2017) Water Plume Temperature Measurements by an Unmanned Aerial System (UAS). *Sensors*. V. 17. No. 2. P. 306.
42. Li F., Yang W., Liu X., at all. (2018) Using high-resolution UAV-borne thermal infrared imagery to detect coal fires in Majiliang mine, Datong coalfield, Northern China. *Remote Sens. Lett.* V. 9. No. 1. P. 71–80.

43. Nishar A., Richards S., Breen D., at all. (2016) Thermal infrared imaging of geothermal environments and by an unmanned aerial vehicle (UAV): A case study of the Wairakei – Tauhara geothermal field, Taupo, New Zealand. *Renew. Energy*. V. 86. P. 1256–1264.
44. Lampert A., Altstädter B., Bärfuss K., at all. (2020) Unmanned Aerial Systems for Investigating the Polar Atmospheric Boundary Layer — Technical Challenges and Examples of Applications. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos11040416> (date of access: 09.10.2020).
45. Neumann P.P., Bartholmai M. (2015) Real-time wind estimation on a micro unmanned aerial vehicle using its inertial measurement unit. *Sensors and Actuators, A: Physical*. V. 235. P. 300–310.
46. Palomaki R.T., Rose N.T., van den Bossche M., at all. (2017) Wind estimation in the lower atmosphere using multirotor aircraft. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. V. 34(5). P. 1183–1191.
47. Segales A.R., Greene B.R., Bell T.M., at all. (2020) The CopterSonde: An Insight into the Development of a Smart UAS for Atmospheric Boundary Layer Research, (January). P. 1–21.
48. Stepanenko V.M., Debolskiy A.V., Varentsov M.I. et al. (2011) *Izuchenie atmosferynoy konveksii nad arkticheskoy polyn'ey s primeneniem superkomp'yuternykh vychisleniy i sputnikovyykh dannyykh vysokogo razresheniya* [Study of atmospheric convection over the Arctic polynia using supercomputer calculations and high-resolution satellite data] *Zemlya iz kosmosa: naibolee effektivnye resheniya* [Earth from space: is the most effective solution]. No. 10. P. 52–55.
49. Esau I.N. (2007) Amplification of turbulent exchange over wide Arctic leads: Large-eddy simulation study. *J. Geophys. Res.* V. 112. No. D8. P. D08109.
50. Vihma T., Pirazzini R., Fer I., at all. (2014) Advances in understanding and parameterization of small-scale physical processes in the marine Arctic climate system: A review. *Atmos. Chem. Phys.* V. 14. No. 17. P. 9403–9450.
51. Barskov K., Stepanenko V., Repina I., at all. (2019) Two Regimes of Turbulent Fluxes Above a Frozen Small Lake Surrounded by Forest. *Boundary-Layer Meteorology*. V. 173. No. 3. P. 311–320.
52. Burk S.D., Fett R.W., Englebreton R.E. (1997) Numerical simulation of cloud plumes emanating from Arctic leads. *J. Geophys. Res. Atmos.* V. 102. No. D14. P. 16529–16544.
53. Varentsov M.I., Samsonov T.E., Kislov A.V., Konstantinov P.I. (2017) *Vosproizvedenie ostrova tepla Moskovskoy aglomeratsii v ramkakh regional'noy klimaticheskoy modeli COSMO-CLM* [Reproduction of the heat island of the Moscow agglomeration in the framework of the regional climate model COSMO-CLM] *Vestnik Moskovskogo un-ta. Ser. 5: Geografiya* [Bulletin of Moscow University. Ser. 5. Geography]. Moscow. No. 6. P. 25–37.
54. Lokoshchenko M.A., Korneva I.A., Kochin A.V. et al. (2016) *O vysotnoy protyazhennosti gorodskogo «ostrova tepla» nad Moskvoy* [On the altitude length of the city «heat island» over Moscow] *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences]. Vol. 466, No. 2. P. 213–217.
55. Chow W., Ho D. (2016) Investigating the vertical dimension of Singapore's urban heat island through quadcopter platforms: an pilot study. *Geophysical Research Abstracts*. V. 5690.
56. Jacobi C., Scherf A., Siemer A.H., Roth R. (1995) On the influence of sensor inertia on the estimation of turbulent fluxes from aircraft measurements. *Boundary-Layer Meteorol.* V. 76. No. 1–2. P. 97–108.

ЭКСПЕРТИЗА И АНАЛИТИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

DOI 10.35264/1996-2274-2020-2-40-64

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭКСПЕРТА

П.Б. Мельник, зам. ген. директора ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук, доцент,
pmelnick@extech.ru

Рецензент: И.И. Курочка

В статье в терминах теорий: множеств, матриц и системного анализа — обоснована математическая модель эксперта и разработан алгоритм формирования ее компонентов, в том числе вектора компетентности эксперта.

Ключевые слова: эксперт, модель, экспертно-аналитические исследования, научно-техническая экспертиза, реестр экспертов, отрасль знания, компетентность.

MATHEMATICAL MODEL OF THE EXPERT

P.B. Melnik, Deputy Director General, SRI FRCEC, Doctor of Engineering,
Associate Professor, *pmelnick@extech.ru*

In the article in terms of theories: sets, matrices and system analysis, the mathematical model of the expert is substantiated and an algorithm for the formation of its components, including the expert's competency vector, is developed.

Keywords: expert, model, expert and analytical research, scientific and technical expertise, expert roster, branch of knowledge, competence.

Введение

Эксперт является ключевым субъектом экспертно-аналитической деятельности, в связи с чем весьма важной задачей представляется его корректное формальное описание, которое, в нашем случае, было бы также приемлемо с точки зрения соответствия предложенной в [14] модели реестра экспертов (далее — Реестр).

В современной научной литературе предлагается несколько подходов к решению данной проблемы. Они, как правило, различаются по назначению процессов, для моделирования которых применяются данные формальные описания, а именно:

- процесса выработки экспертом решения [12] относительно объекта экспертно-аналитических исследований (далее — ЭАИ);
- процесса формирования экспертной группы путем оценки компетентности эксперта [13, 22] и степени его пригодности к проведению ЭАИ.

В терминах рассматриваемой модели Реестра нас будет интересовать второй подход, наиболее полно раскрытый, по мнению автора, в работах [10] и [5, 6].

По характеру информации, используемой при формальном описании экспертов, можно выделить две группы методов [9]:

- *объективные* — основанные на документальной информации и сведениях о результатах практической деятельности экспертов;
- *субъективные* — основанные на собственном мнении экспертов о себе и/или на мнениях их коллег.

К объективным методам относят *документальный* и *экспериментальный*, а к субъективным — методы *самооценки* и *коллективной оценки*. Коллективная оценка, в свою очередь,

может быть реализована методом тайной или открытой *аттестации* (метод «снежного кома») либо методом *взаимной оценки*.

Перечисленные методы позволяют учесть различные качества экспертов, непосредственно или косвенно влияющие на уровень их компетентности и степень пригодности для участия в ЭАИ.

Каждый из указанных методов обладает как достоинствами, так и недостатками [10]. Выход, как и обычно в подобных ситуациях, необходимо искать в некоторых комплексных, комбинированных или «гибридных» решениях, оптимально сочетающих возможную максимизацию преимуществ с минимизацией сопутствующих недостатков.

1. Общие положения

Прежде чем перейти непосредственно к рассмотрению приемлемой модели эксперта, необходимо четко определиться с некоторыми терминами, которые нам понадобятся для правильного понимания сущности ее формального описания [17, 18].

Компетенция — это способность к выполнению какой-либо деятельности на основе приобретенных в ходе обучения знаний, навыков, умений, опыта работы.

Компетенция включает совокупность взаимосвязанных качеств личности (знаний, умений, навыков, способов деятельности), задаваемых по отношению к определенному кругу предметов и процессов и необходимых для качественной продуктивной деятельности по отношению к ним. Или, другими словами, под компетенцией принято понимать:

- знания, опыт, умения и подготовленность к их использованию;
- круг вопросов, в которых индивид обладает хорошей осведомленностью;
- совокупность проблем, относительно которых человек обладает широкими познаниями и опытом их решения.

Компетентность — это свойства личности, определяющие ее способность к выполнению деятельности на основе сформированной компетенции, т. е. это свойство, базирующееся на компетенции. Компетентность — владение, обладание человеком соответствующей компетенцией, включающей его личностное отношение к ней и предмету деятельности.

Иными словами, компетентность — это:

- качество человека, который обладает всесторонними знаниями в определенной области, благодаря чему его мнение является в этой области веским и авторитетным;
- способность к осуществлению жизненного, реального действия, т. е. квалификационная характеристика человека в данный момент свершения позволяет превращать ресурс в продукт;
- потенциальная готовность браться за решение задач, приступая к ним со знанием дела, обладая при этом всеми необходимыми для этого знаниями и умениями;
- умение разбираться в существе рассматриваемой проблемы;
- желание и умение постоянно обновлять знания и навыки для поддержания своего квалификационного уровня, чтобы применять их во всех возможных условиях;
- обладание определенными опытом и знаниями, которые позволят принимать правильные решения.

Лучше всего различие между компетенцией и компетентностью можно выразить следующим образом: компетенция — это потенциал, т. е. обладание знаниями и навыками и наличие способности применять их на практике, а компетентность — это свершившийся реальный факт, т. е. продемонстрированная способность применения на практике имеющихся знаний и навыков.

Квалификация — качество как степень проявления тех или иных достоинств. В некоторых областях этим термином называют либо процесс оценки уровня качества, либо сами предусмотренные уровни. Например, в образовании под квалификацией обычно понимается уровень подготовки выпускников учебных заведений, а квалификация с точки зрения трудовых отношений — это степень или уровень проявления профессиональных достоинств, степень соответствия определенному уровню профессиональных требований или должности.

Также квалификация часто рассматривается как способность работника выполнить задачи и обязанности данной работы. При этом уровень квалификации определяется степенью сложности выполняемой работы, а специализация квалификации — объемом требуемых для выполнения работы знаний, используемых материалов, инструментов и оборудования, видом производимых товаров и услуг. Квалификация приобретается в ходе формального образования и обучения, а также путем опыта работы и неформального обучения. Таким образом, можно обобщить, что квалификация — это:

- степень и вид профессиональной обученности (подготовленности) индивида, наличие у него знаний, умений и навыков, необходимых для выполнения им определенной работы;
- степень профессиональной готовности работников к выполнению трудовых функций в рамках определенной профессии, специальности;
- характеристика определенного вида работы, устанавливаемая в зависимости от его сложности, точности и ответственности.

С точки зрения модели эксперта нас будут интересовать два первых определения. Причем, говоря о *научной квалификации*, будем подразумевать, что речь идет об эксперте как специалисте в той или иной предметной области или отрасли знания. Говоря же о *квалификации эксперта*, необходимо понимать, что имеются в виду уровень подготовки специалиста и его опыт участия в экспертно-аналитических исследованиях именно в качестве эксперта, т. е. как субъекта экспертизы.

2. Модель эксперта

В самом общем виде модель эксперта можно представить в виде упорядоченного множества

$$\mathcal{M}^{\{E\}} = \langle X^{\{E\}}, U^{\{E\}}, P^{\{E\}}, \mathcal{E}^{\{E\}}, Q^{\{E\}}, V^{\{E\}}, \mathcal{R}^{\{E\}}, \Psi^{\{E\}}, T \rangle, \quad (1)$$

где:

$X^{\{E\}}$ — вектор компетентности эксперта;

$U^{\{E\}}$ — множество, характеризующее научную квалификацию эксперта, т. е. совокупность данных о присвоенных ему ученых степенях и ученых званиях с привязкой к номенклатуре научных специальностей ВАК¹ (и/или к используемому классификатору отраслей знания) и датам присвоения соответствующих квалификаций;

$P^{\{E\}}$ — множество, содержащее совокупность данных о публикационной активности эксперта, т. е. информацию о его научных работах и публикациях с привязкой к одному или нескольким классификаторам отраслей знания, показателям (цитируемость, импакт-фактор изданий и т. п.) и датам их опубликования;

$\mathcal{E}^{\{E\}}$ — множество, учитывающее участие эксперта в работе специализированных экспертных советов, комиссий и т. п., а также в ЭАИ, внешних по отношению к Реестру, с привязкой к классификаторам отраслей знания и датам проведения этих мероприятий;

$Q^{\{E\}}$ — множество, отражающее профессиональную историю эксперта как специалиста, т. е. наименование организаций, в которых ему приходилось работать, занимаемые должности, в том числе по совместительству, в составе временных трудовых коллективов либо по индивидуальным трудовым или иным договорам, в привязке к интервалам времени, в течение которых исполнялись эти обязанности или договорные обязательства, к используемому классификатору отраслей знания, а также (при необходимости) к соответствующим геолокационным данным [10];

$V^{\{E\}}$ — множество результатов, полученных экспертом при выполнении работ в составе Реестра, с привязкой к конкретным ЭАИ, используемому классификатору отраслей знания и датам проведения работ;

$\mathcal{R}^{\{E\}}$ — множество оценок квалификации эксперта (т. е. именно как субъекта ЭАИ), полученных на основании субъективных оценок деятельности эксперта как индивида (т. е. его характерных человеческих качеств), выставленных экспертной организацией — оператором Реестра, с привязкой

¹ Высшая аттестационная комиссия при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации.

к группе или конкретным ЭАИ, используемому классификатору отраслей знания и датам проведения работ;

$\Psi^{\{E\}}$ – оператор, описывающий механизм формирования вектора компетентности эксперта $X^{\{E\}}$ как реакцию на внутренние изменения в Реестре и внешние воздействия;

T – множество моментов времени.

Нетрудно заметить, что предложенная модель представляет собой некоторую комбинацию базовых моделей.

Так, например, подмножество $\mathcal{M}_D^{\{E\}} = \langle \mathcal{U}^{\{E\}}, \mathcal{P}^{\{E\}}, \mathcal{E}^{\{E\}}, \mathcal{Q}^{\{E\}} \rangle, \mathcal{M}_D^{\{E\}} \subset \mathcal{M}^{\{E\}}$ является моделью, полученной по документальному методу, и включает набор сведений, характеризующих эксперта Реестра по формальным признакам компетенции и научной квалификации.

Подмножество $\mathcal{M}_E^{\{E\}} = \langle \mathcal{V}^{\{E\}} \rangle, \mathcal{M}_E^{\{E\}} \subset \mathcal{M}^{\{E\}}$ можно считать моделью, построенной на основе экспериментального метода, поскольку оно содержит все результаты деятельности эксперта в рамках Реестра (т.е. ответы эксперта на все вопросы во всех анкетах всех выполненных им ЭАИ).

Подмножество $\mathcal{M}_A^{\{E\}} = \langle \mathcal{R}^{\{E\}} \rangle, \mathcal{M}_A^{\{E\}} \subset \mathcal{M}^{\{E\}}$ относится к моделям, построенным по методу аттестации.

Рассмотренные подмножества $\mathcal{M}_D^{\{E\}}, \mathcal{M}_E^{\{E\}}, \mathcal{M}_A^{\{E\}}$ представляют собой совокупность исходных данных или априорную информацию об экспертах, результатах выполненных ими в рамках Реестра ЭАИ с привязкой к классификаторам отраслей знания и моментам времени, а также оценку квалификации экспертов, которую можно интерпретировать как множество входных сигналов модели эксперта:

$$\Theta^{\{E\}} = \langle \mathcal{M}_D^{\{E\}}, \mathcal{M}_E^{\{E\}}, \mathcal{M}_A^{\{E\}} \rangle. \quad (2)$$

Тогда выражение для оператора $\Psi^{\{E\}}$ можно записать как

$$\Psi^{\{E\}}: \Theta^{\{E\}} \times T \rightarrow X^{\{E\}}, \quad (3)$$

где $X^{\{E\}}$ – вектор компетентности эксперта, который также может рассматриваться как множество выходных сигналов модели $\mathcal{M}^{\{E\}}$.

Вектор компетентности эксперта, описанный в [14], является основополагающим элементом модели эксперта $\mathcal{M}^{\{E\}}$:

$$x_i = \left\| x_{i_1} \cdots x_{j_i} \cdots x_{J_i} \right\|^T, \quad x_{j_i} \in [0, 1], \quad i = \overline{1, I}, \quad (4)$$

где:

I – количество экспертов, зарегистрированных в Реестре;

$\overline{1, J}$ – индексы соответствующих отраслей знания на низшем уровне иерархии используемой классификации.

Как следует из выражения (3), значения элементов вектора $X^{\{E\}}$ рассчитываются на основании всей хранящейся в базе данных Реестра информации, связанной с конкретным экспертом. Вектор $X^{\{E\}}$ по своей сути является динамическим интегральным числовым эквивалентом располагаемой априорной информации об эксперте, всесторонне характеризующим его как субъекта ЭАИ в привязке к текущему моменту времени. Значения элементов вектора компетентности эксперта $X^{\{E\}}$ повсеместно используются в модели Реестра $\mathcal{M}^{\{E\}}$, и прежде всего в процедурах формирования экспертных пулов и групп [15], а также при подготовке решения об аккредитации эксперта в Реестре.

Таким образом, в рассматриваемой модели экспертов $\mathcal{M}^{\{\mathbb{E}\}}$ изначально сочетаются несколько методов. Эту модель и реализующий ее алгоритм целесообразно назвать *адаптивными*, но не в смысле адаптации к объекту ЭАИ или ситуации [10], а в смысле постоянного обновления за счет систематической агрегации и регулярной итеративной коррекции как самих данных, позволяющих достоверно оценить компетентность эксперта в целом [6], так и параметров алгоритмов, по которым эта модель рассчитывается [14].

3. Адаптивный алгоритм формирования вектора компетентности эксперта

Рассмотрим более подробно алгоритм формирования вектора компетентности эксперта $X^{\{\mathbb{E}\}}$ на основе сведений, содержащихся в перечисленных выше компонентах адаптивной модели эксперта $\mathcal{M}^{\{\mathbb{E}\}}$.

Для реализации оператора $\Psi^{\{\mathbb{E}\}}$ в соответствии с выражением (3) необходимо выполнить преобразование множеств, составляющих модель эксперта $\mathcal{M}^{\{\mathbb{E}\}}$ и содержащих информацию различных типов, к единому формату по шкале значений, размерности и смысловой наполненности, а затем уже произвести собственно расчет значений элементов вектора компетентности $X^{\{\mathbb{E}\}}$. Это равносильно разбиению оператора $\Psi^{\{\mathbb{E}\}}$ на два отдельных последовательных оператора – $\Psi_1^{\{\mathbb{E}\}}$ и $\Psi_2^{\{\mathbb{E}\}}$:

$$\Psi^{\{\mathbb{E}\}} \equiv \Psi_2^{\{\mathbb{E}\}}: \left(\Psi_1^{\{\mathbb{E}\}}: \left(\left\| \begin{array}{c} \mathcal{U}^{\{\mathbb{E}\}} \\ \mathcal{P}^{\{\mathbb{E}\}} \\ \mathcal{E}^{\{\mathbb{E}\}} \\ \mathcal{Q}^{\{\mathbb{E}\}} \\ \mathcal{V}^{\{\mathbb{E}\}} \\ \mathcal{R}^{\{\mathbb{E}\}} \end{array} \right\| \times T \right) \rightarrow \left\| \begin{array}{c} U^{\{\mathbb{E}\}} \\ P^{\{\mathbb{E}\}} \\ E^{\{\mathbb{E}\}} \\ Q^{\{\mathbb{E}\}} \\ V^{\{\mathbb{E}\}} \\ R^{\{\mathbb{E}\}} \end{array} \right\| \right) \rightarrow X^{\{\mathbb{E}\}}, \quad (5)$$

где $U^{\{\mathbb{E}\}}, P^{\{\mathbb{E}\}}, E^{\{\mathbb{E}\}}, Q^{\{\mathbb{E}\}}, V^{\{\mathbb{E}\}}, R^{\{\mathbb{E}\}}$ – результирующие векторы, рассчитанные на основании данных и сведений, содержащихся в соответствующих исходных множествах.

3.1. Матрица операторов. Единый классификатор

В интересах упрощения реализации оператора $\Psi_1^{\{\mathbb{E}\}}$ его можно представить в виде матрицы операторов, каждый из которых преобразует одно из исходных множеств в соответствующий вектор единого, общего с $X^{\{\mathbb{E}\}}$ формата:

$$\Psi_1^{\{\mathbb{E}\}} \equiv \left(\left\| \begin{array}{c} \mathcal{U}^{\{\mathbb{E}\}} \\ \mathcal{P}^{\{\mathbb{E}\}} \\ \mathcal{E}^{\{\mathbb{E}\}} \\ \mathcal{Q}^{\{\mathbb{E}\}} \\ \mathcal{V}^{\{\mathbb{E}\}} \\ \mathcal{R}^{\{\mathbb{E}\}} \end{array} \right\| \times T \right) \rightarrow \left\| \begin{array}{c} U^{\{\mathbb{E}\}} \\ P^{\{\mathbb{E}\}} \\ E^{\{\mathbb{E}\}} \\ Q^{\{\mathbb{E}\}} \\ V^{\{\mathbb{E}\}} \\ R^{\{\mathbb{E}\}} \end{array} \right\| \equiv \left\| \begin{array}{c} \Psi^{\{\mathcal{U}, \mathbb{E}\}}: \mathcal{U}^{\{\mathbb{E}\}} \times T \rightarrow U^{\{\mathbb{E}\}} \\ \Psi^{\{\mathcal{P}, \mathbb{E}\}}: \mathcal{P}^{\{\mathbb{E}\}} \times T \rightarrow P^{\{\mathbb{E}\}} \\ \Psi^{\{\mathcal{E}, \mathbb{E}\}}: \mathcal{E}^{\{\mathbb{E}\}} \times T \rightarrow E^{\{\mathbb{E}\}} \\ \Psi^{\{\mathcal{Q}, \mathbb{E}\}}: \mathcal{Q}^{\{\mathbb{E}\}} \times T \rightarrow Q^{\{\mathbb{E}\}} \\ \Psi^{\{\mathcal{V}, \mathbb{E}\}}: \mathcal{V}^{\{\mathbb{E}\}} \times T \rightarrow V^{\{\mathbb{E}\}} \\ \Psi^{\{\mathcal{R}, \mathbb{E}\}}: \mathcal{R}^{\{\mathbb{E}\}} \times T \rightarrow R^{\{\mathbb{E}\}} \end{array} \right\|^T. \quad (6)$$

В качестве основы для такого единого формата целесообразно принять классификатор отраслей знания [14], используемый в модели Реестра экспертов $\mathcal{M}^{\{\mathbb{R}\}}$ и основанный на множестве

$$\Omega = \{\omega_j\}, j = \overline{1, J}, \quad (7)$$

где J – общее количество отраслей знания на низшем уровне иерархии классификатора.

Различные данные и сведения, составляющие исходные множества $\mathcal{U}^{\{\mathbb{E}\}}, \mathcal{P}^{\{\mathbb{E}\}}, \mathcal{E}^{\{\mathbb{E}\}}, \mathcal{Q}^{\{\mathbb{E}\}}, \mathcal{V}^{\{\mathbb{E}\}}, \mathcal{R}^{\{\mathbb{E}\}}$, могут соотноситься с отраслями знания с помощью различных или одновременно нескольких классификаторов, таких как отечественные ГРНТИ [7], УДК, ББК, номенклатура ВАК [3] и международные Web of Science Subject Categories, ASJC Scopus [11], OECD Field of Science and Technology Classification [4], JEL [20] и ряд других, имеющих между собой достаточно сложные связи [19], либо соответствовать сразу нескольким кодам отраслей знания в рамках одного классификатора.

Поэтому в интересах реализации оператора $\Psi_1^{\{\mathbb{E}\}}$ прежде всего необходимо предусмотреть механизм, позволяющий конвертировать различные классификаторы отраслей знания в единый универсальный классификатор (7).

В этих целях зададим массив классификаторов, используемых для идентификации отраслей знания в модели эксперта $\mathcal{M}^{\{\mathbb{E}\}}$:

$$M^{\{\text{Кл}\}} = \left\| \begin{array}{cc} m_1^{\{\text{Кл}\}} & n_1^{\{\text{Кл}\}} \\ \vdots & \vdots \\ m_{cl}^{\{\text{Кл}\}} & n_{cl}^{\{\text{Кл}\}} \\ \vdots & \vdots \\ m_{cl_{\max}}^{\{\text{Кл}\}} & n_{cl_{\max}}^{\{\text{Кл}\}} \end{array} \right\|, \quad (8)$$

где:

$m_{cl}^{\{\text{Кл}\}}, cl = \overline{1, cl_{\max}}$ — наименование или шифр классификатора;

$n_{cl}^{\{\text{Кл}\}}, cl = \overline{1, cl_{\max}}$ — количество отраслей знания на низшем уровне иерархии классификатора $m_{cl}^{\{\text{Кл}\}}$;

cl_{\max} — общее количество классификаторов, используемых для идентификации данных и сведений по отраслям знания в рамках модели эксперта $\mathcal{M}^{\{\mathbb{E}\}}$.

При этом условимся, что сам единый универсальный классификатор также будет учтен в массиве $M^{\{\text{Кл}\}}$, например, под индексом $cl = 1$.

Каждый из классификаторов $m_{cl}^{\{\text{Кл}\}}$ в формализованном виде можно представить как упорядоченное множество

$$\Omega^{\{cl\}} = \{\omega_{sp}^{\{cl\}}\}, sp = \overline{1, n_{cl}^{\{\text{Кл}\}}}, cl = \overline{1, cl_{\max}}, \quad (9)$$

где sp — индекс отрасли знания на низшем уровне иерархии классификатора $m_{cl}^{\{\text{Кл}\}}$.

Введем семейство операторов, задающих соответствие из множества отраслей знания каждого из классификаторов $\Omega^{\{cl\}}$ в универсальное множество отраслей знания Ω , используемое в моделях $\mathcal{M}^{\{\mathbb{R}\}}$ и $\mathcal{M}^{\{\mathbb{E}\}}$:

$$C^{\{cl\}} \subseteq \Omega^{\{cl\}} \times \Omega, cl = \overline{1, cl_{\max}}. \quad (10)$$

Каждый из операторов $C^{\{cl\}}$ представляет собой множество упорядоченных пар $(\omega^{\{cl\}}, \omega)$, связанных рассматриваемым соответствием:

$$\rho_C^{\{cl\}}(\omega^{\{cl\}}) = \{\omega: \omega \in \Omega \wedge (\omega^{\{cl\}}, \omega) \in C^{\{cl\}}\}. \quad (11)$$

Соответствие $C^{\{cl\}}$ также может быть задано с помощью матрицы размером $J \times n_{cl}^{\{Kл\}}$:

$$\Xi^{\{cl\}} = \left\| \begin{array}{cccc} \xi_{11}^{\{cl\}} & \dots & \xi_{1sp}^{\{cl\}} & \dots & \xi_{1n_{cl}^{\{Kл\}}}^{\{cl\}} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \xi_{j1}^{\{cl\}} & \dots & \xi_{jsp}^{\{cl\}} & \dots & \xi_{jn_{cl}^{\{Kл\}}}^{\{cl\}} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \xi_{J1}^{\{cl\}} & \dots & \xi_{Jsp}^{\{cl\}} & \dots & \xi_{Jn_{cl}^{\{Kл\}}}^{\{cl\}} \end{array} \right\|, \xi_{jsp}^{\{cl\}} = \begin{cases} 1, \text{ при } (\omega_{sp}^{\{cl\}}, \omega_j) \in C^{\{cl\}}, \\ 0, \text{ при } (\omega_{sp}^{\{cl\}}, \omega_j) \notin C^{\{cl\}}. \end{cases} \quad (12)$$

В матрицах $\Xi^{\{cl\}}$ каждый столбец $\Xi_{sp}^{\{cl\}} = \|\xi_{1sp}^{\{cl\}} \dots \xi_{jsp}^{\{cl\}} \dots \xi_{Jsp}^{\{cl\}}\|^T, sp = 1, n_{cl}^{\{Kл\}}$ показывает, какому набору отраслей знания универсального множества Ω соответствует конкретная отрасль знания sp множества $\Omega^{\{cl\}}$, соответствующего классификатору $m_{cl}^{\{Kл\}}$.

Отдельно отметим, что матрица $\Xi^{\{1\}}$, связывающая единый классификатор сам с собой, будет квадратной размером $J \times J$ и диагональной, т. е.

$$\xi_{jsp}^{\{1\}} = \begin{cases} 1, j = sp, \\ 0, j \neq sp, \end{cases} sp = 1, n_1^{\{Kл\}}, j = 1, J, n_1^{\{Kл\}} = J. \quad (13)$$

3.2. Расчет вектора компетентности. Весовые коэффициенты

Выражение для оператора $\Psi_2^{\{\mathbb{E}\}}$ с учетом (5) можно записать как

$$\Psi_2^{\{\mathbb{E}\}}: \|U^{\{\mathbb{E}\}} P^{\{\mathbb{E}\}} E^{\{\mathbb{E}\}} Q^{\{\mathbb{E}\}} V^{\{\mathbb{E}\}} R^{\{\mathbb{E}\}}\| \rightarrow X^{\{\mathbb{E}\}}. \quad (14)$$

Обозначим матрицу результирующих векторов как

$$\mathcal{X}_{\Sigma}^{\{\mathbb{E}\}} = \|U^{\{\mathbb{E}\}} P^{\{\mathbb{E}\}} E^{\{\mathbb{E}\}} Q^{\{\mathbb{E}\}} V^{\{\mathbb{E}\}} R^{\{\mathbb{E}\}}\|. \quad (15)$$

Тогда реализующий $\Psi_2^{\{\mathbb{E}\}}$ алгоритм можно представить в виде аддитивной функции

$$X^{\{\mathbb{E}\}} = \frac{1}{\vartheta_{\max}} \sum_{\vartheta=1}^{\vartheta_{\max}} k_{\vartheta}^{\{\mathbb{E}\}} \cdot (\mathcal{X}_{\Sigma}^{\{\mathbb{E}\}})_{\vartheta}, \quad (16)$$

где:

$k_{\vartheta}^{\{\mathbb{E}\}} \in [0, 1]$ – весовые коэффициенты при соответствующих векторах, характеризующие уровень их значимости или степень влияния на результирующий вектор компетентности $X^{\{\mathbb{E}\}}$;

ϑ_{\max} – количество результирующих векторов в выражении (14).

В описании моделей $\mathcal{M}^{\{\mathbb{R}\}}$ и $\mathcal{M}^{\{\mathbb{E}\}}$ определено, что все элементы вектора компетентности эксперта удовлетворяют условию $x_{j,i} \in [0, 1]$. Компоненты матрицы результирующих векторов, как будет показано в следующих параграфах, также должны быть нормированы в этом диапазоне, поэтому в выражении (16) присутствует усредняющий множитель $1/\vartheta_{\max}$.

Весовые коэффициенты должны удовлетворять ряду условий. Прежде всего, их сумма должна быть равной 1:

$$\sum_{\vartheta=1}^{\vartheta_{\max}} k_{\vartheta}^{\{\mathbb{E}\}} = 1. \quad (17)$$

Напомним, что векторы, составляющие матрицу $\mathcal{X}_{\Sigma}^{\{E\}}$, формируются из исходных множеств, относящихся к трем группам: $\mathcal{M}_D^{\{E\}}, \mathcal{M}_{\mathcal{E}}^{\{E\}}, \mathcal{M}_A^{\{E\}}$, различающихся методами получения данных и сведений об эксперте. Распределение весов между суммарными коэффициентами этих групп также должно отражать, какое влияние на компетентность эксперта оказывают содержащиеся в них факторы.

В начальный момент времени $t = 0$ — начало отсчета времени существования Реестра — весовым коэффициентам присваиваются некие произвольные значения, основанные на субъективных оценках разработчиков и/или операторов Реестра. Из самых общих соображений их целесообразно установить равнозначными:

$$k_D^{\{E\}} = k_{\mathcal{E}}^{\{E\}} = k_A^{\{E\}}, \quad k_D^{\{E\}} + k_{\mathcal{E}}^{\{E\}} + k_A^{\{E\}} = 1. \quad (18)$$

Затем, в процессе дальнейшего развития и эксплуатации Реестра, эти значения могут быть скорректированы в интересах повышения эффективности как Реестра в целом, так и составляющих его отдельных процедур. Таким образом, указанные весовые коэффициенты могут быть рассмотрены как один из компонентов набора параметров алгоритмов функционирования Реестра [14], посредством изменения которых реализуется процесс управления Реестром как системой.

На момент времени $t = t_0^{\{E\}}$, фиксирующий начало деятельности эксперта в составе Реестра на абсолютной шкале времени, где $t = 0$ — начало отсчета времени существования Реестра, располагаемый массив информации об эксперте ограничивается лишь документальной частью $\mathcal{M}_D^{\{E\}}$, тогда как экспериментальная и аттестационная составляющие $\mathcal{M}_{\mathcal{E}}^{\{E\}}, \mathcal{M}_A^{\{E\}}$ отсутствуют, поэтому базовый (начальный) вектор компетентности может быть определен только на основании данных, содержащихся в множествах $\mathcal{U}^{\{E\}}, \mathcal{P}^{\{E\}}, \mathcal{E}^{\{E\}}, \mathcal{Q}^{\{E\}}$. В связи с этим возникает необходимость установления некоего порога или максимально допустимой доли первичной информации при оценке компетентности эксперта.

Для этого введем условие, задающее распределение значений весовых коэффициентов внутри составляющей $\mathcal{M}_D^{\{E\}}$ по аналогичному (18) принципу:

$$k_U^{\{E\}} + k_P^{\{E\}} + k_E^{\{E\}} + k_Q^{\{E\}} = \sum_{\vartheta=1}^4 k_{\vartheta}^{\{E\}} = k_D^{\{E\}} = (x_{\text{пор.}}^{\{E\}})_0, \quad (19)$$

где $(x_{\text{пор.}}^{\{E\}})_0$ — пороговое (максимально допустимое) значение элементов вектора компетентности $X_0^{\{E\}} = X^{\{E\}}(t = t_0^{\{E\}})$ в начальный момент $t_0^{\{E\}}$.

Очевидно, что в процессе жизненного цикла эксперта в Реестре содержимое множеств $\mathcal{U}^{\{E\}}, \mathcal{P}^{\{E\}}, \mathcal{E}^{\{E\}}, \mathcal{Q}^{\{E\}}$ будет изменяться, и поэтому после того, как эксперт разместит в Реестре сведения об этих изменениях, соответствующие векторы необходимо перерассчитать, так же как и вектор компетентности эксперта $X^{\{E\}}$ в целом.

4. Алгоритмы формирования компонентов адаптивной модели эксперта

4.1. Вектор научной квалификации эксперта

Множество $\mathcal{U}^{\{E\}}$, характеризующее научную квалификацию эксперта, можно представить как совокупность кортежей

$$\mathcal{U}^{\{E\}} = \{u_v^{\{E\}}\} = \{(kv, sp, t)_v^{\{E\}}\} = \{(kv_v, sp_v, t_v)^{\{E\}}\}, \quad v = \overline{1, v_{\max}}, \quad (20)$$

где:

kv — индекс научной квалификации, присвоенной эксперту, в массиве $M^{(Kv)}$ возможных значений ученых степеней и ученых званий [2] и соответствующих им весовых коэффициентов;

sp – индекс научной специальности, по которой эксперту присвоена квалификация, в массиве номенклатуры научных специальностей ВАК [3];

t – дата присвоения квалификации;

v_{\max} – количество документально подтвержденных научных квалификаций эксперта.

Массив $M^{\{Кв\}}$ можно записать в виде соответствующей матрицы

$$M^{\{Кв\}} = \begin{pmatrix} m_1^{\{Кв\}} & k_1^{\{Кв\}} \\ \vdots & \vdots \\ m_{kv}^{\{Кв\}} & k_{kv}^{\{Кв\}} \\ \vdots & \vdots \\ m_{kv_{\max}}^{\{Кв\}} & k_{kv_{\max}}^{\{Кв\}} \end{pmatrix}, \quad (21)$$

где:

$m_{kv}^{\{Кв\}}$, $kv = \overline{1, kv_{\max}}$ – наименование ученой степени или ученого звания;

$k_{kv}^{\{Кв\}}$, $kv = \overline{1, kv_{\max}}$ – весовой коэффициент ученой степени или ученого звания.

В множестве $\mathcal{U}^{\{E\}}$ в качестве классификатора используется номенклатура научных специальностей ВАК. В связи с этим для перехода к универсальному классификатору, применяемому в модели Реестра $\mathcal{M}^{\{R\}}$ и модели эксперта $\mathcal{M}^{\{E\}}$, необходимо использовать матрицу связи этих классификаторов (12) из семейства $\Xi^{\{cl\}}$. Обозначим ее $\Xi^{\{BAK\}}$.

В матрице $\Xi^{\{BAK\}}$ каждый столбец $\Xi_{sp}^{\{BAK\}} = \|\xi_{1\ sp}^{\{BAK\}} \dots \xi_{j\ sp}^{\{BAK\}} \dots \xi_{J\ sp}^{\{BAK\}}\|^T$, $sp = \overline{1, sp_{\max}}$ показывает, какому набору отраслей знания из единого классификатора соответствует конкретная специальность по номенклатуре ВАК – sp , где sp_{\max} – общее количество научных специальностей на низшем уровне иерархии номенклатуры ВАК.

Запишем выражение для оператора, преобразующего множество $\mathcal{U}^{\{E\}}$, характеризующее научную квалификацию эксперта, в вектор $\mathcal{U}^{\{E\}}$:

$$\Psi^{\{U, E\}}: \mathcal{U}^{\{E\}} \rightarrow U^{\{E\}}, \quad (22)$$

где:

$U^{\{E\}} = \|u_1^{\{E\}} \dots u_j^{\{E\}} \dots u_J^{\{E\}}\|^T$ – вектор научной квалификации i -го эксперта;

$U_i = \|u_{1i} \dots u_{ji} \dots u_{Ji}\|^T$, $i = \overline{1, I}$ – нормированный вектор научной квалификации i -го эксперта;

I – количество экспертов, зарегистрированных в Реестре;

$j = \overline{1, J}$ – индексы соответствующих отраслей знания на низшем уровне иерархии используемого универсального классификатора.

На основании вышеизложенного реализующий $\Psi^{\{U, E\}}$ алгоритм можно записать в виде следующей последовательности преобразований:

$$U^{\{E\}} = \sum_{v=1}^{v_{\max}} \left((k_{kv}^{\{Кв\}})_v \cdot (\Xi_{sp}^{\{BAK\}})_v \right) =$$

$$\sum_{v=1}^{v_{\max}} \left((k_{kv}^{\{Кв\}})_v \cdot \|(\xi_{1\ sp}^{\{BAK\}})_v \dots (\xi_{j\ sp}^{\{BAK\}})_v \dots (\xi_{J\ sp}^{\{BAK\}})_v\|^T \right) =$$

$$\begin{aligned} & \sum_{v=1}^{v_{\max}} \left(\left\| (k_{kv}^{\{KB\}})_v \cdot (\xi_{1\ sp}^{\{BAK\}})_v \cdots (k_{kv}^{\{KB\}})_v \cdot (\xi_{j\ sp}^{\{BAK\}})_v \right\|^T \right) = \\ & \left\| \sum_{v=1}^{v_{\max}} (k_{kv}^{\{KB\}})_v \cdot (\xi_{1\ sp}^{\{BAK\}})_v \cdots \sum_{v=1}^{v_{\max}} (k_{kv}^{\{KB\}})_v \cdot (\xi_{j\ sp}^{\{BAK\}})_v \right\|^T = \\ & \|u_1^{\{E\}} \cdots u_j^{\{E\}} \cdots u_j^{\{E\}}\|^T. \end{aligned} \quad (23)$$

Дополнительно необходимо сказать несколько слов о весовых коэффициентах $K_{kv}^{\{KB\}}$.

Очевидно, что эксперт может иметь несколько официальных, документально подтвержденных квалификаций по различным специальностям номенклатуры ВАК. Коэффициенты $K_{kv}^{\{KB\}}$ должны быть подобраны таким образом, чтобы, с одной стороны, учитывать разницу в значимости различных квалификаций (например, значимость ученой степени «доктор наук» больше, чем ученой степени «кандидат наук», и т.д.), а с другой — чтобы их максимально возможная сумма в пределах произвольной отрасли знаний $\overline{1, J}$ не превышала 1, т.е.

$$\forall j = \overline{1, J}: \sum_{v=1}^{v_{\max}} (k_{kv}^{\{KB\}})_v \cdot (\xi_{1\ sp}^{\{BAK\}})_v \leq 1. \quad (24)$$

Это ограничение можно также задать на уровне массива $M^{\{KB\}}$ как

$$\sum_{v=1}^{v_{\max}} (k_{kv}^{\{KB\}})_v = 1. \quad (25)$$

Требование (25) является необходимым, а (24) — необходимым и достаточным, однако, чтобы обеспечить обязательное выполнение (24), введем дополнительное искусственное ограничение (нормирование)

$$u_{ji} = \begin{cases} u_j^{\{E\}}, & u_j^{\{E\}} \leq 1 \\ 1, & u_j^{\{E\}} > 1 \end{cases}, j = \overline{1, J}, i = \overline{1, I}. \quad (26)$$

То есть если в силу непредвиденной специфики i -го эксперта или неоднозначности преобразования классификации отраслей знания расчетное значение суммы в пределах произвольной отрасли знаний $j = \overline{1, J}$ превысит 1, то соответствующему элементу вектора научной квалификации u_{ji} будет присвоено значение 1.

4.2. Вектор публикационной активности эксперта

Оценку публикационной активности эксперта как автора научных трудов можно провести различными способами. Нас эта задача интересует с точки зрения подсчета количества и нахождения степени соответствия научных трудов эксперта отраслям знаний на низшем уровне иерархии классификации, используемой в моделях $\mathcal{M}^{\{R\}}$ и $\mathcal{M}^{\{E\}}$. При этом представляется целесообразным учитывать при расчетах такие факторы, как уровень издания (например, квартиль или импакт-фактор журнала и т.п.), его значимость (с точки зрения трудозатрат, т.е.: доклад, статья, монография, отчет, книга и т.п.), цитируемость, коэффициент участия эксперта в разработке конкретных научных трудов и даты их опубликования.

По своему смыслу эту характеристику эксперта можно было бы также отнести к его научной квалификации, однако публикационная активность, с одной стороны, в большей степени динамична по отношению к изменениям в ученой степени или ученом звании эксперта, а с другой — позволяет более точно описать отрасль знания конкретного научного труда по сравнению с классификатором ВАК, что существенно повышает качество оценки компетентности эксперта в целом. Кроме этого, научные труды могут соотноситься с отраслями знания с помощью различных или одновременно нескольких классификаторов.

Учитывая указанную специфику, публикационную активность все же желательно рассматривать как отдельный фактор.

Множество $\mathcal{P}^{\{\mathbb{E}\}}$, содержащее совокупность данных, характеризующих публикационную активность эксперта, можно представить как совокупность кортежей

$$\mathcal{P}^{\{\mathbb{E}\}} = \{(ku, qu, Sp, t)_{r'}^{\{\mathbb{E}\}}\} = \{(ku_{r'}, qu_{r'}, Sp_{r'}, t_{r'})^{\{\mathbb{E}\}}\}, r' = \overline{1, r'_{\max}}, \quad (27)$$

где:

$ku \in [0, 1]$ — коэффициент участия эксперта в научном труде r' ;

qu — индекс уровня издания, в котором опубликован научный труд эксперта, в массиве $M^{\{\text{yp}\}}$ возможных значений уровней издания и значимости научных трудов и соответствующих им весовых коэффициентов;

Sp — массив индексов отраслей знания, к которым при публикации отнесен научный труд в соответствии с одним или несколькими классификаторами;

t — дата опубликования научного труда;

r'_{\max} — количество документально подтвержденных научных трудов эксперта.

Массив $M^{\{\text{yp}\}}$ уровней издания можно записать в виде соответствующей матрицы

$$M^{\{\text{yp}\}} = \left\| \begin{array}{cc} m_1^{\{\text{yp}\}} & k_1^{\{\text{yp}\}} \\ \vdots & \vdots \\ m_{qu}^{\{\text{yp}\}} & k_{qu}^{\{\text{yp}\}} \\ \vdots & \vdots \\ m_{qu_{\max}}^{\{\text{yp}\}} & k_{qu_{\max}}^{\{\text{yp}\}} \end{array} \right\|, \quad (28)$$

где:

$m_{qu}^{\{\text{yp}\}}, qu = \overline{1, qu_{\max}}$ — наименование или шифр уровней издания;

$k_{qu}^{\{\text{yp}\}} \in [0, 1], qu = \overline{1, qu_{\max}}$ — весовой коэффициент уровня издания.

Примером массива $M^{\{\text{yp}\}}$ может послужить таблица, приведенная в Методике расчета качественного показателя государственного задания «Комплексный балл публикационной результативности» [1] для научных организаций, подведомственных Министерству науки и высшего образования Российской Федерации, которая, кстати, сочетает в себе и учет уровня издания и значимости научного труда.

Значения коэффициента K_m качества статьи (журнала)*

Шифр	Q1	Q2	Q3	Q4	Q	S	R	V	B
K_m	19,7	7,3	2,7	1	1	1	0,75	0,5	1

* В таблице использованы следующие обозначения:

Q1, Q2, Q3, Q4 — публикации в изданиях, индексируемых Web of Science Core Collection;

- Q – публикации в изданиях без квартиля, но входящие в Web of Science Core Collection;
 S – публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и не индексируемых в Web of Science;
 R – публикации в журналах из RSCI Web of Science, не индексируемых в Core Collection Web of Science и Scopus (по данным РИНЦ);
 V – публикации в журналах списка ВАК, не входящих в вышеперечисленные пункты (по данным РИНЦ);
 В – монографии, зарегистрированные в Российской книжной палате.

Приведенную таблицу можно расширить за счет добавления других видов изданий и научных трудов (например, отчет о НИР, доклад на конференции, книга, учебник и т. п.) и соответствующих им весовых коэффициентов, которые необходимо нормировать таким образом, чтобы соблюсти условие $\forall k_{qu}^{\{yp\}} \in [0, 1], qu = \overline{1, qu_{\max}}$.

Как уже указывалось выше, научные труды могут соотноситься с отраслями знания с помощью различных или одновременно нескольких классификаторов, поэтому для их перевода в единый универсальный классификатор необходимо воспользоваться матрицей связи (12).

Массив Sp_r , описывающий принадлежность научного труда r к тем или иным отраслям знания, можно формализовать следующим образом:

$$Sp_r = \left\{ (cl, sp, k^{(sp)})_n \right\}_{r^r} = \left\{ (cl_n, sp_n, k_n^{(sp)}) \right\}_{r^r}, r = \overline{1, r_{\max}}, n = \overline{1, n_r}$$

$$cl \in [1, cl_{\max}], k^{(sp)} \in [0, 1], \forall r \in [1, r_{\max}]: \sum_{n=1}^{n_r} (k_n^{(sp)})_{r^r} = 1, \quad (29)$$

где:

$(cl, sp, k^{(sp)})$ – идентификационная группа, указывающая связь научного труда с конкретной отраслью знания sp и содержащая индекс классификатора cl , индекс отрасли знания sp в этом классификаторе, а также весовой коэффициент $k^{(sp)}$, характеризующий долю отрасли знаний sp в научном труде;

n_r – общее количество отраслей знания (идентификационных групп), указанных при публикации научного труда r .

Оператор, преобразующий множество $\mathcal{P}^{\{\mathbb{E}\}}$, характеризующее публикационную активность эксперта, в вектор $P^{\{\mathbb{E}\}}$, можно записать как

$$\Psi^{\{\mathcal{P}, \mathbb{E}\}}: \mathcal{P}^{\{\mathbb{E}\}} \rightarrow P^{\{\mathbb{E}\}}, \quad (30)$$

где:

$P^{\{\mathbb{E}\}} = \|p_1^{\{\mathbb{E}\}} \dots p_j^{\{\mathbb{E}\}} \dots p_I^{\{\mathbb{E}\}}\|^T$ – вектор публикационной активности i -го эксперта;

$P_i = \|p_{1i} \dots p_{ji} \dots p_{Ii}\|^T, i = \overline{1, I}$ – нормированный вектор публикационной активности i -го эксперта;

I – количество экспертов, зарегистрированных в Реестре;

$j = \overline{1, J}$ – индексы соответствующих отраслей знания на низшем уровне иерархии используемого универсального классификатора.

С учетом (12), (27)–(29) алгоритм, реализующий $\Psi^{\{\mathcal{P}, \mathbb{E}\}}$, примет вид:

$$P^{\{\mathbb{E}\}} = \sum_{r=1}^{r_{\max}} \left(ku \cdot k_{qu}^{\{yp\}} \cdot \sum_{n=1}^{n_r} (k_n^{(sp)} \cdot \Xi_{sp_n}^{\{cl_n\}}) \right)_{r^r} =$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{r=1}^{r_{\max}} \sum_{n=1}^{n_r} \left(ku \cdot k_{qu}^{\{yp\}} \cdot k_n^{\{sp\}} \cdot \|\xi_{1sp_n}^{\{cl_n\}} \dots \xi_{Jsp_n}^{\{cl_n\}}\|^T \right)_{\mathcal{r}} = \\
 & \sum_{r=1}^{r_{\max}} \sum_{n=1}^{n_r} \left(\|ku \cdot k_{qu}^{\{yp\}} \cdot k_n^{\{sp\}} \cdot \xi_{1sp_n}^{\{cl_n\}} \dots ku \cdot k_{qu}^{\{yp\}} \cdot k_n^{\{sp\}} \cdot \xi_{Jsp_n}^{\{cl_n\}}\|^T \right)_{\mathcal{r}} = \\
 & \left\| \sum_{r=1}^{r_{\max}} \sum_{n=1}^{n_r} \left(ku \cdot k_{qu}^{\{yp\}} \cdot k_n^{\{sp\}} \cdot \xi_{1sp_n}^{\{cl_n\}} \right)_{\mathcal{r}} \dots \sum_{r=1}^{r_{\max}} \sum_{n=1}^{n_r} \left(ku \cdot k_{qu}^{\{yp\}} \cdot k_n^{\{sp\}} \cdot \xi_{Jsp_n}^{\{cl_n\}} \right)_{\mathcal{r}} \right\|^T = \\
 & \|p_1^{\{\mathbb{E}\}} \dots p_j^{\{\mathbb{E}\}} \dots p_J^{\{\mathbb{E}\}}\|^T.
 \end{aligned} \tag{31}$$

Нормируем полученный вектор, используя в качестве мер максимальные значения элементов $p_j^{\{\mathbb{E}\}}$ для i -й отрасли знания среди всех экспертов Реестра:

$$\mu(p_j^{\{\mathbb{E}\}}) = \max_{\{\mathbb{E}\}}(p_j^{\{\mathbb{E}\}}) = \max_{i=1, \bar{I}}(p_j^{\{\mathbb{E}\}}). \tag{32}$$

Тогда

$$\begin{aligned}
 P_i &= \left\| \frac{p_1^{\{\mathbb{E}\}}}{\mu(p_1^{\{\mathbb{E}\}})} \dots \frac{p_j^{\{\mathbb{E}\}}}{\mu(p_j^{\{\mathbb{E}\}})} \dots \frac{p_J^{\{\mathbb{E}\}}}{\mu(p_J^{\{\mathbb{E}\}})} \right\|^T = \\
 & \|p_{1i} \dots p_{ji} \dots p_{Ji}\|^T, p_{ji} \in [0,1], i = \overline{1, I}.
 \end{aligned} \tag{33}$$

4.3. Вектор начального опыта эксперта

Множество $\mathcal{E}^{\{\mathbb{E}\}}$ учитывает участие эксперта в работе специализированных экспертных советов, комиссий и т. п., а также в ЭАИ, внешних по отношению к Реестру, и может быть использовано для оценки базового (начального) располагаемого опыта эксперта по осуществлению экспертно-аналитической деятельности (далее – ЭАД) на момент его регистрации (аккредитации) в Реестре.

Множество $\mathcal{E}^{\{\mathbb{E}\}}$ можно представить в виде упорядоченной совокупности кортежей

$$\mathcal{E}^{\{\mathbb{E}\}} = \{(qz, Sp, t)_{\mathcal{g}}^{\{\mathbb{E}\}}\} = \{(qz_{\mathcal{g}}, Sp_{\mathcal{g}}, t_{\mathcal{g}})_{\mathcal{g}}^{\{\mathbb{E}\}}\}, \mathcal{g} = \overline{1, \mathcal{g}_{\max}}, \tag{34}$$

где:

qz – индекс значимости мероприятия ЭАД, в котором принял участие эксперт, в массиве $M^{\{3n\}}$ возможных уровней значимости мероприятий ЭАД и соответствующих им весовых коэффициентов;

Sp – массив индексов отраслей знания, к которым отнесено мероприятие ЭАД в соответствии с одним или несколькими классификаторами;

t – дата проведения мероприятия;

\mathcal{g}_{\max} – количество мероприятий ЭАД, участие эксперта в которых подтверждено документально.

Массив $M^{\{3H\}}$ уровней значимости мероприятий ЭАД запишем в виде матрицы

$$M^{\{3H\}} = \begin{bmatrix} m_1^{\{3H\}} & k_1^{\{3H\}} \\ \vdots & \vdots \\ m_{qz}^{\{3H\}} & k_{qz}^{\{3H\}} \\ \vdots & \vdots \\ m_{qz_{\max}}^{\{3H\}} & k_{qz_{\max}}^{\{3H\}} \end{bmatrix}, \quad (35)$$

где:

$m_{qz}^{\{3H\}}, qz = \overline{1, qz_{\max}}$ – наименование значимости мероприятия;

$k_{qz}^{\{3H\}} \in [0, 1], qz = \overline{1, qz_{\max}}$ – весовой коэффициент уровня значимости мероприятия.

Для идентификации отраслей знания, к которым относятся мероприятия ЭАД с участием эксперта, целесообразно использовать массив классификаторов $M^{[Kл]}$ и соответствующие его элементам матрицы связи $\Xi^{[cl]}, cl = \overline{1, cl_{\max}}$, выражения (8) и (12) соответственно.

Массив Sp_g , описывающий принадлежность мероприятия ЭАД к тем или иным отраслям знания, по аналогии с (24) запишем в следующем виде:

$$Sp_g = \left\{ (cl, sp, k^{\{sp\}})_n \right\}_g = \left\{ (cl_n, sp_n, k_n^{\{sp\}}) \right\}_g, g = \overline{1, g_{\max}}, n = \overline{1, n_g}, \quad (36)$$

$$cl \in [1, cl_{\max}], k^{\{sp\}} \in [0, 1], \forall g \in [1, g_{\max}]: \sum_{n=1}^{n_g} (k_n^{\{sp\}})_g = 1,$$

где:

$(cl, sp, k^{\{sp\}})$ – идентификационная группа, указывающая связь мероприятия g с конкретной отраслью знания sp и содержащая индекс классификатора cl , индекс отрасли знания sp в этом классификаторе, а также весовой коэффициент $k^{\{sp\}}$, характеризующий долю отрасли знаний sp в этом мероприятии;

n_g – общее количество отраслей знания (идентификационных групп), указанных в описании мероприятия g .

Рассмотрим оператор, отображающий множество мероприятий $\mathcal{E}^{\{E\}}$ в вектор начального опыта эксперта $E^{\{E\}}$:

$$\Psi^{\{\mathcal{E}, E\}}: \mathcal{E}^{\{E\}} \rightarrow E^{\{E\}}, \quad (37)$$

где:

$E^{\{E\}} = \|\epsilon_1^{\{E\}} \dots \epsilon_j^{\{E\}} \dots \epsilon_J^{\{E\}}\|^T$ – вектор начального опыта i -го эксперта;

$E_i = \|\epsilon_{1i} \dots \epsilon_{ji} \dots \epsilon_{Ji}\|^T, i = \overline{1, I}$ – нормированный вектор начального опыта i -го эксперта;

I – количество экспертов, зарегистрированных в Реестре;

$j = \overline{1, J}$ – индексы соответствующих отраслей знания на низшем уровне иерархии используемого универсального классификатора.

По аналогии с (23) и (31) реализующий $\Psi^{\{\mathcal{E}, \mathbb{E}\}}$ алгоритм будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}^{\{\mathbb{E}\}} &= \sum_{g=1}^{g_{\max}} \left(k_{qz}^{\{3H\}} \cdot \sum_{n=1}^{n_g} \left(k_n^{\{sp\}} \cdot \Xi_{spn}^{\{cln\}} \right) \right)_g = \\ &= \left\| \sum_{g=1}^{g_{\max}} \sum_{n=1}^{n_g} \left(k_{qz}^{\{3H\}} \cdot k_n^{\{sp\}} \cdot \xi_{1spn}^{\{cln\}} \right)_g \quad \dots \quad \sum_{g=1}^{g_{\max}} \sum_{n=1}^{n_g} \left(k_{qz}^{\{3H\}} \cdot k_n^{\{sp\}} \cdot \xi_{jspn}^{\{cln\}} \right)_g \right\|^T = \\ &= \left\| \epsilon_1^{\{\mathbb{E}\}} \quad \dots \quad \epsilon_j^{\{\mathbb{E}\}} \quad \dots \quad \epsilon_j^{\{\mathbb{E}\}} \right\|^T. \end{aligned} \quad (38)$$

Нормируем полученный вектор, используя в качестве мер максимальные значения элементов $\epsilon_j^{\{\mathbb{E}\}}$ для j -й отрасли знания среди всех экспертов Реестра:

$$\mu(\epsilon_j^{\{\mathbb{E}\}}) = \max_{\{\mathbb{E}\}}(\epsilon_j^{\{\mathbb{E}\}}) = \max_{i=1, \bar{I}}(\epsilon_j^{\{\mathbb{E}\}}), \quad (39)$$

$$\begin{aligned} E_i &= \left\| \frac{\epsilon_1^{\{\mathbb{E}\}}}{\mu(\epsilon_1^{\{\mathbb{E}\}})} \quad \dots \quad \frac{\epsilon_j^{\{\mathbb{E}\}}}{\mu(\epsilon_j^{\{\mathbb{E}\}})} \quad \dots \quad \frac{\epsilon_j^{\{\mathbb{E}\}}}{\mu(\epsilon_j^{\{\mathbb{E}\}})} \right\|^T = \\ &= \left\| \epsilon_{1i} \quad \dots \quad \epsilon_{ji} \quad \dots \quad \epsilon_{ji} \right\|^T, \epsilon_{ji} \in [0, 1], i = \overline{1, I}. \end{aligned} \quad (40)$$

4.4. Вектор научных интересов эксперта

Основным назначением множества $Q^{\{\mathbb{E}\}}$, формализующего профессиональную историю эксперта, является прежде всего отражение информации, необходимой для устранения возможного конфликта интересов при формировании экспертных групп либо при подборе эксперта для выполнения конкретного ЭАИ.

Привязка информации к геолокационным данным (адреса организаций, адрес проживания и т. п.) позволяет ранжировать экспертов, например, с точки зрения знания специфики региона (что существенно для таких отраслей знания, как геология, экология и т. п.) или же в зависимости от их удаленности от объекта ЭАИ или места возникновения той или иной ситуации [10] (в случае, если для подготовки заключения необходим выезд эксперта).

К этой же группе факторов можно также отнести научно-педагогический стаж и информацию об областях научных интересов, заявленных экспертом, которые могут быть учтены при количественных расчетах. При этом, чтобы не создавать излишне сложные сущности, условимся, что научно-педагогический стаж эксперта равномерно распределен между областями научных интересов, указанными им при регистрации в Реестре в виде кодов универсального классификатора.

Тогда в части, касающейся указанных расчетов, множество $Q^{\{\mathbb{E}\}}$ можно представить следующим образом:

$$Q^{\{\mathbb{E}\}} = \{St^{\{\mathbb{E}\}}, Sp^{\{\mathbb{E}\}}, t\}, \quad (41)$$

где:

$St^{\{\mathbb{E}\}}$ – научно-педагогический стаж эксперта, выраженный в годах;

$Sp^{\{E\}} = \{sp_n\}, n = \overline{1, n^{\{E\}}}$ – массив индексов отраслей знания в соответствии с универсальным классификатором, указанных экспертом как области его научных интересов;
 $n^{\{E\}}$ – размер массива $Sp^{\{E\}}$;
 t – момент оценки элементов множества $Q^{\{E\}}$.

Оператор, преобразующий множество $Q^{\{E\}}$ в соответствующий вектор $Q^{\{E\}}$, можно записать как

$$\Psi^{\{Q, E\}}: Q^{\{E\}} \rightarrow Q^{\{E\}}, \quad (42)$$

где:

$Q^{\{E\}} = \|q_1^{\{E\}} \dots q_j^{\{E\}} \dots q_J^{\{E\}}\|^T$ – вектор научных интересов i -го эксперта;

$Q_i = \|q_{1i} \dots q_{ji} \dots q_{Ji}\|^T, i = \overline{1, I}$ – нормированный вектор научных интересов i -го эксперта;

I – количество экспертов, зарегистрированных в Реестре;

$j = \overline{1, J}$ – индексы соответствующих отраслей знания на низшем уровне иерархии используемого универсального классификатора.

Реализующий $\Psi^{\{Q, E\}}$ алгоритм будет иметь вид:

$$Q^{\{E\}} = \frac{St^{\{E\}}}{n^{\{E\}}} \sum_{n=1}^{n^{\{E\}}} (\Xi_{sp_n}^{\{1\}}) = \left\| \sum_{n=1}^{n^{\{E\}}} \left(\frac{St^{\{E\}}}{n^{\{E\}}} \cdot \xi_{1 sp_n}^{\{1\}} \right) \dots \sum_{n=1}^{n^{\{E\}}} \left(\frac{St^{\{E\}}}{n^{\{E\}}} \cdot \xi_{J sp_n}^{\{1\}} \right) \right\|^T =$$

$$\|q_1^{\{E\}} \dots q_j^{\{E\}} \dots q_J^{\{E\}}\|^T. \quad (43)$$

Нормируем полученный вектор, используя в качестве мер максимальные значения элементов $q_j^{\{E\}}$ для i -й отрасли знания среди всех экспертов Реестра:

$$\mu(q_j^{\{E\}}) = \max_{\{E\}}(q_j^{\{E\}}) = \max_{i=\overline{1, I}}(q_j^{\{E\}}), \quad (44)$$

$$Q_i = \left\| \frac{q_1^{\{E\}}}{\mu(q_1^{\{E\}})} \dots \frac{q_j^{\{E\}}}{\mu(q_j^{\{E\}})} \dots \frac{q_J^{\{E\}}}{\mu(q_J^{\{E\}})} \right\|^T =$$

$$\|q_{1i} \dots q_{ji} \dots q_{Ji}\|^T, q_{ji} \in [0, 1], i = \overline{1, I}. \quad (45)$$

4.5. Вектор результативности эксперта

Результативность эксперта можно понимать по-разному. С одной стороны, это могут быть количественные характеристики, например количество ЭАИ, выполненных экспертом в рамках Реестра, а с другой – качественные, такие как достоверность полученных результатов или эффективность работы эксперта. Однако, в любом случае, эти качественные оценки должны быть численными, и здесь возникает ряд сложностей, связанных с их расчетом.

Одной из основных и самых главных задач, ради решения которых и создавался Реестр, является организация и проведение экспертизы научно-технических проектов различных уровней сложности. Мнение экспертного сообщества, выраженное в подготовленных экспертных заключениях, служит одним из средств поддержки при принятии решения о необходимости реализации указанных проектов.

В силу своей сложности и длительности исполнения реальные результаты выполнения таких проектов становятся доступны лишь спустя достаточно длительный промежуток времени — от одного года до трех лет и более. Поэтому оценить правильность выводов и рекомендаций, подготовленных экспертом в отношении этих проектов, также представляется возможным лишь по истечении указанных временных интервалов. Еще в большей степени сложной является оценка правильности выводов эксперта в отношении отклоненных проектов. Кроме того, ряд ЭАИ в силу своей специфики вообще не предусматривает какой-либо отчетности о результатах выполнения проходивших экспертизу проектов.

Отсутствие в обозримом временном интервале информации об успешности или неудаче реализации таких проектов не позволяет своевременно оценить достоверность и эффективность эксперта непосредственно.

Существующие методы косвенной оценки качественных характеристик эксперта, не требующие обратной информационной связи, также не всегда могут быть применимы, поскольку содержат в своей основе весьма неоднозначную аксиоматику (постулаты). Примером могут послужить методы, основанные на аксиоме несмещенности [8, 5, 21], утверждающей превосходство мнения группы над мнением индивида. В соответствии с ними эксперты, мнение которых об объекте ЭАИ отличается от мнения, которого придерживается большинство экспертов группы, оцениваются за выполненную работу тем ниже, чем больше различие их позиции с позицией большинства в группе экспертов, выполняющих конкретное ЭАИ.

В этом отношении весьма знаменательны слова А.И. Орлова относительно так называемой догмы согласованности [16]: «Часто без всяких оснований считается, что решение может быть принято лишь на основе согласованных мнений экспертов. Поэтому исключают из экспертной группы тех, чье мнение отличается от мнения большинства. При этом отсеиваются как неквалифицированные лица, попавшие в состав экспертной комиссии по недоразумению или по соображениям, не имеющим отношения к их профессиональному уровню, так и наиболее оригинальные мыслители, глубже проникшие в проблему, чем большинство. Следовало бы выяснить их аргументы, предоставить им возможность для обоснования их точек зрения. Вместо этого их мнением пренебрегают».

Кроме этого, следует отметить, что для достижения статистически значимых величин отклонения мнения отдельного эксперта от мнения группы размеры такой группы должны превышать 20–30 человек, что совершенно невыгодно с экономической точки зрения на организацию процесса ЭАИ.

Таким образом, с учетом вышесказанного условимся, что под результативностью эксперта мы будем понимать лишь оценку количества ЭАИ, в которых принял участие эксперт, без учета качества его работы (эффективности, объективности, достоверности и т. п.). Тем не менее следует отметить, что высокая частота привлечения эксперта к ЭАИ косвенно может свидетельствовать о его востребованности, т. е. о соответствии результатов его работы перечисленным качествам.

Множество результатов, полученных экспертом при выполнении работ в составе Реестра $\mathcal{V}^{\{E\}}$, формируется экспериментальным методом и содержит все результаты деятельности эксперта в рамках Реестра, в том числе ответы эксперта на все вопросы во всех экспертных картах (анкетах) всех выполненных им ЭАИ, выставленные им баллы, сформулированные выводы и высказанные рекомендации.

Множество результатов, полученных экспертом при выполнении работ в составе Реестра $\mathcal{V}^{\{E\}}$, является подмножеством массива W , описанного в [14] и содержащего всю информацию о результатах работы всех экспертов Реестра: $\mathcal{V}^{\{E\}} \subset W$.

Напомним, что W представляет собой четырехмерную матрицу размерностью $M \times K \times J \times I$, где: I — количество экспертов в Реестре; J — количество отраслей знания на низшем уровне

иерархии универсального классификатора; K – количество выполненных ЭАИ, учтенных в Реестре; M – размерность вектора результатов ЭАИ.

Тогда множество $\mathcal{V}^{\{\mathbb{E}\}}$ можно рассматривать как подмножество сечения массива W по координате i (т.е. трехмерного массива (матрицы) размерностью $M \times K \times J$) в части, касающейся учета результатов ЭАИ, относящихся к эксперту: $\mathcal{V}^{\{\mathbb{E}\}} \subset W_i$.

Множество $\mathcal{W}^{\{\mathbb{E}\}}$ можно представить в виде упорядоченной совокупности кортежей

$$\mathcal{V}^{\{\mathbb{E}\}} = \left\{ \left(k_k^{\{\text{ЭН}\}}, z_k, T_k \right)^{\{\mathbb{E}\}} \right\}, k = \overline{1, k_{\max}}, \quad (46)$$

где:

$k_k^{\{\text{ЭН}\}} \in [0,1]$ – весовой коэффициент, характеризующий значимость k -го ЭАИ;

$z_k \in [0,1]$ – весовой коэффициент, отражающий степень участия эксперта в k -м ЭАИ;

T_k – вектор моментов времени, связанных с k -м ЭАИ (например, начало работы, начало и завершение этапов, окончание работы и т. п.);

$k_{\max} \leq K$ – количество ЭАИ, в которых принял участие эксперт в рамках Реестра;

K – количество ЭАИ, выполненных и учтенных в Реестре.

Рассмотрим методику расчета весовых коэффициентов.

Эксперт может участвовать в ЭАИ как единолично, так и в составе экспертной группы. Эти ЭАИ могут быть различной степени значимости (сложности). Для того чтобы учесть степень участия эксперта в конкретном ЭАИ, а также уровень значимости (сложности) этого исследования, целесообразно воспользоваться таким параметром, как трудозатраты.

Удобство этого параметра состоит прежде всего в том, что он подлежит обязательному учету при оформлении трудовых отношений между экспертом и организацией – оператором Реестра. Помимо этого, все действия эксперта при совершении им любых, в том числе и связанных с выполнением ЭАИ, операций в Реестре регистрируются, привязываются к моментам времени и сохраняются в базе данных Реестра, что позволяет также косвенно оценить реальные трудозатраты эксперта.

Так, если трудозатраты эксперта отнести к трудозатратам на проведение конкретного ЭАИ в целом (т.е. к сумме трудозатрат всех экспертов, участвовавших в этом ЭАИ), то получим коэффициент участия эксперта в оцениваемом исследовании:

$$z_k = f(T_k) / \sum_{\{\mathbb{E}\}} f(T_k), \quad (47)$$

где $f(T_k)$ – функция, реализующая алгоритм расчета трудозатрат на основании данных вектора моментов времени (вектора истории) ЭАИ T_k .

При этом очевидно, что сумма коэффициентов участия всех экспертов, являющихся исполнителями оцениваемого ЭАИ, будет равна 1, т.е. $\sum_{\{\mathbb{E}\}} z_k = 1$.

Отношение трудозатрат на конкретное ЭАИ к трудозатратам на самое сложное ЭАИ (т.е. трудозатраты на выполнение которого максимальны среди всех ЭАИ, учтенных в Реестре) определит коэффициент значимости (сложности) оцениваемого ЭАИ:

$$k_k^{\{\text{ЭН}\}} = \sum_{\{\mathbb{E}\}} f(T_k) / \max_{k=1, K} \left(\sum_{\{\mathbb{E}\}} f(T_k) \right). \quad (48)$$

Оператор, преобразующий множество $\mathcal{V}^{\{\mathbb{E}\}}$ в соответствующий вектор $V^{\{\mathbb{E}\}}$, можно записать как

$$\Psi^{\{\mathcal{V}, \mathbb{E}\}}: \mathcal{V}^{\{\mathbb{E}\}} \rightarrow V^{\{\mathbb{E}\}}, \quad (49)$$

где:

$V^{\{\mathbb{E}\}} = V_i = \|v_{1i} \ \dots \ v_{ji} \ \dots \ v_{Ii}\|^T, i = \overline{1, I}$ – нормированный вектор результативности i -го эксперта;

I – количество экспертов, зарегистрированных в Реестре;

$j = \overline{1, J}$ – индексы соответствующих отраслей знания на низшем уровне иерархии используемого универсального классификатора.

Реализующий $\Psi^{\{\mathcal{V}, \mathbb{E}\}}$ алгоритм с учетом выражений (46)–(48) можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} V_i &= A_i \cdot \frac{1}{k_{\max}} \sum_{k=1}^K (k_k^{\{\mathbb{Z}_H\}} \cdot z_{ik} \cdot Y_k) = \left\| \begin{pmatrix} a_{1i} \\ \vdots \\ a_{ji} \\ \vdots \\ a_{Ii} \end{pmatrix} \right\| \cdot \frac{1}{k_{\max}} \sum_{k=1}^K \left(k_k^{\{\mathbb{Z}_H\}} \cdot z_{ik} \cdot \left\| \begin{pmatrix} y_{1k} \\ \vdots \\ y_{jk} \\ \vdots \\ y_{Jk} \end{pmatrix} \right\| \right) = \\ &= \left\| \begin{pmatrix} a_{1i} \\ \vdots \\ a_{ji} \\ \vdots \\ a_{Ii} \end{pmatrix} \right\| \cdot \sum_{k=1}^K \left(\frac{1}{k_{\max}} \cdot \frac{f(T_{ik})}{\sum_{i=1}^I f(T_{ik})} \cdot \frac{\sum_{i=1}^I f(T_{ik})}{\max_{k=\overline{1, K}} (\sum_{i=1}^I f(T_k))} \cdot \left\| \begin{pmatrix} y_{1k} \\ \vdots \\ y_{jk} \\ \vdots \\ y_{Jk} \end{pmatrix} \right\| \right) = \\ &= \left\| \sum_{k=1}^K \left(\frac{a_{1i} \cdot y_{1k} \cdot f(T_k)}{k_{\max} \cdot \max_{k=\overline{1, K}} (\sum_{i=1}^I f(T_k))} \right) \ \dots \ \sum_{k=1}^K \left(\frac{a_{Ii} \cdot y_{Jk} \cdot f(T_k)}{k_{\max} \cdot \max_{k=\overline{1, K}} (\sum_{i=1}^I f(T_k))} \right) \right\|^T = \\ &= \|v_{1i} \ \dots \ v_{ji} \ \dots \ v_{Ii}\|^T, i = \overline{1, I}. \end{aligned} \quad (50)$$

где:

$A_i = \|a_{1i} \ \dots \ a_{ji} \ \dots \ a_{Ii}\|^T, i = \overline{1, I}$ – столбец матрицы A , увязывающей множество экспертов Реестра и отрасли знания, в которых они компетентны [14];

$Y_k = \|y_{1k} \ \dots \ y_{jk} \ \dots \ y_{Jk}\|^T, j = \overline{1, J}$ – научно-технический профиль k -го ЭАИ;

$z_{ik} \in [0, 1]$ – весовой коэффициент, характеризующий степень участия i -го эксперта в k -м исследовании и удовлетворяющий условию $\forall k = \overline{1, K}: \sum_{i=1}^I z_{ik} = 1$.

4.6. Вектор квалификации эксперта как субъекта ЭАИ

Оценка деятельности эксперта как субъекта ЭАИ в реальности, как правило, проводится в отношении группы однородных ЭАИ, выполненных экспертом в рамках одной процедуры (конкурса, этапа и т. п.). При этом оценке подлежат все свойства эксперта, проявляемые им непосредственно в процессе выполнения ЭАИ, т. е. не только качество его работы (эффективность, объективность, достоверность и т. п.), но и присущие ему характерные человеческие качества (внимание, обязательность, аккуратность, корректность и т. д.). Перечень таких свойств может быть весьма разнообразным.

Очевидно, что такие интегральные оценки носят интуитивно-субъективный характер. Тем не менее многолетний опыт взаимодействия организации – оператора Реестра с экспертным сообществом показывает, что именно такие оценки, как правило, имеют наибольший приоритет при формировании экспертных пулов и групп для предстоящих ЭАИ. Это особенно важно при планировании так называемых массовых ЭАИ, тем более если они проводятся в пределах жестко заданных временных интервалов.

Как уже было отмечено в предыдущем параграфе, векторы результативности и квалификации эксперта частично взаимосвязаны между собой, поскольку базируются на одном и том же подмножестве ЭАИ, выполненных экспертом в рамках Реестра.

Множество $\mathcal{R}^{\{\mathbb{E}\}}$ можно представить в виде упорядоченной совокупности кортежей

$$\mathcal{R}^{\{\mathbb{E}\}} = \{(\delta_k, t_k)^{\{\mathbb{E}\}}\}, k = \overline{1, k_{\max}}, \quad (51)$$

где:

$\delta_k \in [-0.5, 0.5]$ – интегральная оценка эксперта за выполнение k -го ЭАИ;

$k_{\max} \leq K$ – количество ЭАИ в рамках Реестра, участие эксперта в выполнении которых было оценено организацией – оператором Реестра;

K – количество ЭАИ, выполненных и учтенных в Реестре;

t_k – момент (дата) оценки.

Оператор, преобразующий множество $\mathcal{R}^{\{\mathbb{E}\}}$ в соответствующий вектор $R^{\{\mathbb{E}\}}$, можно записать как

$$\Psi^{\{\mathcal{R}, \mathbb{E}\}}: \mathcal{R}^{\{\mathbb{E}\}} \rightarrow R^{\{\mathbb{E}\}}, \quad (52)$$

где:

$\mathcal{R}^{\{\mathbb{E}\}} = R_i = \|r_{1i} \ \dots \ r_{ji} \ \dots \ r_{ji}\|^T, i = \overline{1, I}$ – нормированный вектор квалификации i -го эксперта;

I – количество экспертов, зарегистрированных в Реестре;

$j = \overline{1, J}$ – индексы соответствующих отраслей знания на низшем уровне иерархии используемого универсального классификатора.

Реализующий $\Psi^{\{\mathcal{R}, \mathbb{E}\}}$ алгоритм имеет вид:

$$\begin{aligned} R_i &= A_i \cdot \frac{1}{k_{\max}} \sum_{k=1}^K (\delta_{ik} \cdot Y_k) = \left\| \begin{pmatrix} a_{1i} \\ \vdots \\ a_{ji} \\ \vdots \\ a_{ji} \end{pmatrix} \right\| \cdot \frac{1}{k_{\max}} \sum_{k=1}^K \left(\delta_{ik} \cdot \left\| \begin{pmatrix} y_{1k} \\ \vdots \\ y_{jk} \\ \vdots \\ y_{jk} \end{pmatrix} \right\| \right) = \\ &= \left\| \sum_{k=1}^K \left(\frac{\delta_{ik} \cdot a_{1i} \cdot y_{1k}}{k_{\max}} \right) \ \dots \ \sum_{k=1}^K \left(\frac{\delta_{ik} \cdot a_{ji} \cdot y_{jk}}{k_{\max}} \right) \right\|^T = \\ &= \|r_{1i} \ \dots \ r_{ji} \ \dots \ r_{ji}\|^T, i = \overline{1, I}, \end{aligned} \quad (53)$$

где:

$A_i = \|a_{1i} \ \dots \ a_{ji} \ \dots \ a_{ji}\|^T, i = \overline{1, I}$ – столбец матрицы, увязывающей множество экспертов Реестра и отрасли знания, в которых они компетентны [14];

$Y_k = \|y_{1k} \ \dots \ y_{jk} \ \dots \ y_{jk}\|^T, j = \overline{1, J}$ – научно-технический профиль k -го ЭАИ;

$\delta_{ik} \in [-0.5, 0.5]$ – интегральная оценка i -го эксперта за k -е ЭАИ.

Следует обратить особое внимание на то, что вектор R_i является единственным из компонентов вектора компетентности, элементы которого могут принимать отрицательные значения и, соответственно, нормированы в другом, отличном от остальных компонентов диапазоне. Эта особенность позволяет учесть в рассматриваемых алгоритмах возможную отрицательную динамику (регресс) компетентности эксперта.

В связи с этим необходимо исключить возникновение ситуации, когда многократное отрицательное оценивание деятельности эксперта может привести к появлению отрицательных значений элементов вектора компетентности эксперта, что, по его определению, недопустимо (4).

Для этого введем дополнительное ограничение

$$x_{ji} = \begin{cases} x_j^{\{E\}}, & x_j^{\{E\}} \in [0, 1] \\ 0, & x_j^{\{E\}} < 0 \end{cases}, j = \overline{1, J}, i = \overline{1, I}. \quad (54)$$

5. Регресс компетентности эксперта

Отрицательная динамика компетентности эксперта, помимо негативных оценок его деятельности по выполнению ЭАИ, может быть также связана с другими причинами.

Так, в ряде работ, посвященных моделированию процессов ЭАИ и деятельности экспертов, предлагается использование математических механизмов, отражающих естественное снижение значимости данных и сведений, используемых при оценке компетентности эксперта, с течением времени (устаревание информации) [6]. Представляется вполне очевидным, что данные и сведения, содержащиеся в компонентах модели эксперта $\mathcal{M}^{\{E\}}$, со временем могут терять свою актуальность.

Для моделирования таких регрессионных процессов целесообразно использовать экспоненциальную функцию, асимптотически стремящуюся к нулю при возрастании аргумента:

$$f(t) = a \cdot e^{-\lambda t}, \lambda \geq 0, \quad (55)$$

где: a — начальное значение параметра; λ — коэффициент, характеризующий скорость изменения параметра; t — время.

Применять такую методику, учитывающую тенденцию изменения тех или иных факторов, участвующих в формировании вектора компетентности, можно как при расчетах конкретных значений каждого из элементов результирующих векторов, так и применительно ко всем элементам вектора одновременно. При этом в качестве начального значения функции a можно использовать коэффициенты значимости (например, в выражениях (21), (28), (35) и (46)), а в качестве λ — некую эмпирическую величину, отражающую скорость научно-технологического развития той или иной области знания:

$$k_{ij}^{\{E\}}(t) = k_{ij}^{\{E\}}(t_i^{\{E\}}) \cdot e^{-\lambda_j(t-t_i^{\{E\}})}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}, \quad (56)$$

где:

$k_{ij}^{\{E\}}(t)$ — значение коэффициента значимости, используемого при расчетах значения j -го элемента результирующего вектора из числа используемых в модели эксперта $\mathcal{M}^{\{E\}}$, для i -го эксперта в момент времени t ;

$k_{ij}^{\{E\}}(t_i^{\{E\}})$ — начальное значение рассматриваемого коэффициента значимости на момент времени $t_i^{\{E\}}$ регистрации данных и сведений, связанных с коэффициентом;

$\lambda_j \geq 0$ — скорость научно-технологического развития j -й области знаний.

Однако следует отметить, что формализация такого регрессионного процесса связана с рядом трудностей, связанных прежде всего с определением значений параметра λ для различных областей знания. Вероятно, более целесообразным было бы установление некоего единого параметра устаревания информации $\lambda^{\{E\}}$ в рамках модели $M^{\{E\}}$.

Заключение

Таким образом, были рассмотрены все элементы модели эксперта $M^{\{E\}}$, включая оператор $\Psi^{\{E\}}$ формирования вектора компетентности эксперта $X^{\{E\}}$.

Выше уже упоминалось о необходимости регулярного перерасчета значений элементов $X^{\{E\}}$ после изменения экспертом подмножества $M_D^{\{E\}}$ документальных сведений. Следует отметить, что эта процедура должна быть осуществлена не только в отношении конкретного эксперта $X^{\{E\}}$, внесшего изменения, но и для всех остальных экспертов Реестра. Такая необходимость связана прежде всего с нормированием элементов результирующих векторов $U^{\{E\}}, P^{\{E\}}, E^{\{E\}}, Q^{\{E\}}$, подразумевающим анализ сведений о всех экспертах, аккредитованных в Реестре (см. (32), (39) и (44)).

Аналогичную процедуру целесообразно проводить после проведения группы ЭАИ, особенно массовых, поскольку они вносят существенный вклад в векторы результативности и квалификации эксперта, а следовательно, и в вектор его компетентности $X^{\{E\}}$.

Уровень проработки предложенных алгоритмов расчета вектора компетентности и формирования его компонентов на основании располагаемых данных и сведений позволяет реализовать их с помощью большинства известных средств программирования, а отдельные их элементы уже нашли практическое применение в информационной системе Федерального реестра экспертов научно-технической сферы Минобрнауки России, организацией-оператором которого является ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ.

Статья подготовлена в рамках научно-исследовательской работы, проводимой ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ по государственному заданию № 075-01394-20-02 на 2020 г. Министерства образования и науки РФ в сфере экспертизы по проекту 730000Ф.99.1.БВ15АА00003.

Список литературы

1. О корректировке государственного задания с учетом методики расчета комплексного балла публикационной результативности: Письмо заместителя Министра науки и высшего образования Российской Федерации от 14.01.2020 № МН-8/6-СК.
2. Об утверждении Единого реестра ученых степеней и ученых званий и Положения о порядке присуждения ученых степеней: Постановление Правительства РФ от 30.01.2002 № 74.
3. Об утверждении номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени: Приказ Минобрнауки России от 23.10.2017 № 1027.
4. Working Party of National Experts on Science and Technology Indicators [Online] // The Organization for Economic Co-operation and Development. OECD, 2019. URL: <http://www.oecd.org/science/inno/38235147.pdf> (дата обращения: 27.05.2020).
5. Бурков Е.А. Определение компетентности экспертов на основе поставленных ими оценок // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2009. № 4. С. 20–24.
6. Бурков Е.А., Карпачевский А.В., Падерно П.И. Оценка компетентности экспертов на основе результативности их участия в экспертизах // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. № 10. С. 38–44.
7. Государственный рубрикатор НТИ России / Томский гос. пед. ун-т (ТГПУ), 2020. URL: <https://www.tspu.edu.ru/tspu/files/file/grnti.pdf> (дата обращения: 27.05.2020).
8. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике / пер. с фр. М.: Радио и связь, 1990.
9. Ельмеев В.Я., Овсянников В.Г. Прикладная социология: очерки методологии / 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Изд-во С.-Петербургского гос. ун-та, 1999. С. 296.

10. Еременко В.Т. и др. Моделирование процесса формирования экспертной группы по заданной тематике // Информационные системы и технологии. Орел: Госуниверситет – УНПК, 2012. № 3 (71). С. 23–30.
11. Классификация ASJC (All Science Journals Classification) Scopus // Российская академия архитектуры и строительных наук (оф. сайт). РААСН, 2020. URL: http://www.raasn.ru/academy/materials/general_meeting/elections/2018/Классификация%20журналов%20по%20тематикам,%20используемая%20в%20Scopus%20-%20Классификация%20ASJC%20Scopus%20для%20распределения%20журналов%20по%20предметным%20областям.pdf (дата обращения: 27.05.2020).
12. Крюковский А.С., Лебедева Т.В. Математическая модель эксперта при оценке информационной безопасности системы // Вестник Российского нового ун-та. 2016. Вып. 3: Сложные системы: модели, анализ и управление. С. 5–9.
13. Крюковский В.В. Формирование эталонного варианта модели специалиста-эксперта с использованием теории прецедентов // Новые компьютерные технологии. Кривой Рог: Криворожский нац. ун-т, 2011. № 1 (9). Т. 9. С. 106–107.
14. Мельник П.Б. Математическая постановка задачи формирования реестра экспертов // Инноватика и экспертиза. 2014. № 2 (13). С. 69–81.
15. Мельник П.Б. Методика формирования экспертных пулов и групп для проведения экспертно-аналитических исследований // Инноватика и экспертиза. 2017. № 1 (19). С. 39–54.
16. Орлов А.И. Теория принятия решений: учеб. пособие. М.: Экзамен, 2005.
17. Словари и энциклопедии на Академике // Академик, 2002–2020. URL: <https://dic.academic.ru> (дата обращения: 27.05.2020).
18. Словарь по профориентации и психологической поддержке // Национальная энциклопедическая служба России – НЭС. 2020. URL: <https://vocabulary.ru/slovary/slovar-po-proforientacii-i-psihologicheskoi-podderzhke.html> (дата обращения: 27.05.2020).
19. Стерлигов И.А. Песнь о классификаторах: OECD, ГРНТИ, ВАК, WoS, Scopus, МСКО... / Blogger. 2013. URL: <http://isterligov.blogspot.com/2013/09/oecd-wos-scopus.html> (дата обращения: 27.05.2020).
20. Тематический классификатор Journal of Economic Literature (JEL) // Библиотечно-информационный комплекс Финансового ун-та при Правительстве РФ. 1998–2020. URL: <http://www.library.fa.ru/files/JEL.pdf> (дата обращения: 27.05.2020).
21. Фомов А.П. Модель учета степени расхождения экспертных оценок // Сб. науч. трудов по материалам международной науч.-практ. конф. Ч. 7. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2013.
22. Чернышева Т.В. Модель многокритериальной оценки экспертов // Альманах современной науки и образования. Тамбов: Грамота, 2008. № 9 (16). С. 242–245.

References

1. *O korrrektirovke gosudarstvennogo zadaniya s uchetom metodiki rascheta kompleksnogo balla publikatsionnoy rezul'tativnosti. Pis'mo zamestitelya Ministra nauki i vysshego obrazovaniya Rossiyskoy Federatsii ot 14.01.2020 No. MN-8/6-SK* [On adjusting the state assignment, taking into account the methodology for calculating the complex score of publication performance: Letter from the Deputy Minister of Science and Higher Education of the Russian Federation dated January 14, 2020. No. MN-8/6-SK].
2. *Ob utverzhdenii Edinogo reestra uchenykh stepeney i uchenykh zvanii i Polozheniya o poryadke pri-suzhdeniya uchenykh stepeney: Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 30.01.2002 No. 74* [On the approval of the Unified Register of Academic Degrees and Academic Ranks and the Regulations on the Procedure for the Awarding of Academic Degrees: Resolution of the Government of the Russian Federation No. 74 dated January 30, 2002].
3. *Ob utverzhdenii nomenklatury nauchnykh spetsial'nostey, po kotorym prisuzhdayutsya uchenye stepeni. Prikaz Minobrnauki Rossii ot 23.10.2017 No. 1027* [On the approval of the nomenclature of scientific specialties for which academic degrees are awarded: Order of the Ministry of Education and Science of Russia No. 1027 dated 23.10.2017].
4. Working Party of National Experts on Science and Technology Indicators. The Organization for Economic Co-operation and Development. OECD (2019). Available at: <http://www.oecd.org/science/inno/38235147.pdf> (date of access: 27.05.2020).

5. Burkov E.A. (2009) *Opređenje kompetentnosti ekspertov na osnovu postavlenykh imi otsenok* [Determination of the competence of experts on the basis of their estimates] *Izv. SPbGETU «LETI»* [Izv. SPbGETU «LETI»]. No. 4. P. 20–24.
6. Burkov E.A., Karpachevsky A.V., Paderno P.I. (2011) *Otsenka kompetentnosti ekspertov na osnovu rezultativnosti ikh uchastiya v ekspertizakh* [Assessment of the competence of experts on the basis of the effectiveness of their participation in examination] *Izv. SPbGETU «LETI»* [Izv. SPbGETU «LETI»]. No. 10. P. 38–44.
7. *Gosudarstvennyy rubrikator NTI Rossii, 2020* [State rubricator of NTI of Russia. (2020)] *Tomskiy gos. ped. un-t (TGPU)* [Tomsk state ped. university (TSPU)]. Available at: <https://www.tspu.edu.ru/tspu/files/file/grnti.pdf> (date of access: 27.05.2020).
8. Dubois D., Prade A. (1990) *Teoriya vozmozhnostey. Prilozheniya k predstavleniyu znaniy v informatike. Per. s fr.* [Theory of possibilities. Applications to the representation of knowledge in computer science. Translation from French] *Radio i svyaz'* [Radio and communication]. Moscow.
9. Elmeev V.Ya., Ovsyannikov V.G. (1999) *Prikladnaya sotsiologiya: ocherki metodologii. 2-e izd., ispr. i dop.* [Applied Sociology: Essays on Methodology. 2nd ed. Rev. and add] *Izd-vo Sankt Peterburgskogo gos. un-ta* [Publishing house of the St. Petersburg State University]. St. Petersburg. P. 296.
10. Eremenko V.T. et al. (2012) *Modelirovanie protsessa formirovaniya ekspertnoy gruppy po zadannoy tematike. Informatsionnye sistemy i tekhnologii* [Modeling the process of forming an expert group on a given topic. Information systems and technologies] *Orel Gosuniversitet – UNPK* [Orel State University – UPPK]. Orel. No. 3 (71). P. 23–30.
11. *Klassifikatsiya ASJC (All Science Journals Classification) Scopus. Rossiyskaya akademiya arkhitektury i stroitel'nykh nauk (of. sayt). RAASN, 2020* [Classification ASJC (All Science Journals Classification) Scopus. Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (official Site). RAASN. (2020)]. Available at: http://www.raasn.ru/academy/materials/general_meeting/elections/2018/Классификация%20журналов%20по%20темам,%20используемая%20в%20Scopus%20-%20Классификация%20ASJC%20Scopus%20для%20распределения%20журналов%20по%20предметным%20областям.pdf (date of access: 27.05.2020).
12. Kryukovsky A.S., Lebedeva T.V. (2016) *Matematicheskaya model' eksperta pri otsenke informatsionnoy bezopasnosti sistemy. Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie* [Mathematical model of an expert in assessing the information security of a system. Complex systems: models, analysis and management] *Vestnik Rossiyskogo novogo un-ta* [Bulletin of the Russian New University]. Issue. 3. P. 5–9.
13. Kryuchkovsky V.V. (2011) *Formirovanie etalonnogo varianta modeli spetsialista-eksperta s ispol'zovaniem teorii pretsedentov* [Formation of the reference version of the model of a specialist-expert using the theory of precedents] *Novye komp'yuternye tekhnologii* [New computer technologies] *Krivorozhskiy nats. un-t* [Krivoy Rog national university]. Krivoy Rog. No. 1 (9). Vol. 9. P. 106–107.
14. Melnik P.B. (2014) *Matematicheskaya postanovka zadachi formirovaniya reestra ekspertov.* [Mathematical formulation of the problem of forming the Roster of experts] *Innovatika i ekspertiza* [Innovation and Expert Examination]. Moscow. No. 2 (13). P. 69–81.
15. Melnik P.B. (2017) *Metodika formirovaniya ekspertnykh pulov i grupp dlya provedeniya ekspertno-analiticheskikh issledovaniy* [Methodology for the formation of expert pools and groups for expert and analytical research] *Innovatika i ekspertiza* [Innovation and Expert Examination]. Moscow. No. 1 (19). P. 39–54.
16. Orlov A.I. (2005) *Teoriya prinyatiya resheniy: ucheb. posobie* [Decision making theory: textbook]. *Ekzamen* [Exam]. Moscow.
17. *Slovari i entsiklopedii na Akademike 2002-2020* [Dictionaries and encyclopedias on Academician (2002–2020)] *Akademik* [Academician]. Available at: <https://dic.academic.ru> (date of access: 27.05.2020).
18. *Slovar' po proforientatsii i psikhologicheskoy podderzhke. Natsional'naya entsiklopedicheskaya sluzhba Rossii – NES* [Dictionary of vocational guidance and psychological support. National Encyclopedic Service of Russia – NES (2020)]. Available at: <https://vocabulary.ru/slovari/slovar-po-proforientatsii-i-psihologicheskoi-podderzhke.html> (date of access: 27.05.2020).
19. Sterligov I.A. (2013) *Pesn' o klassifikatorakh: OECD, GRNTI, VAK, WoS, Scopus, MSKO* [Song of the classifiers: OECD, GRNTI, VAK, WoS, Scopus, ISCED]. Blogger. Available at: <http://isterligov.blogspot.com/2013/09/oecd-wos-scopus.html> (date of access: 27.05.2020).

20. *Tematicheskiy klassifikator Journal of Economic Literature (JEL). Bibliotechno-informatsionnyy kompleks Finansovogo un-ta pri Pravitel'stve RF (1998–2020)* [Thematic classifier Journal of Economic Literature (JEL). Library and information complex of the Financial University under the Government of the Russian Federation (1998–2020)]. Available at: <http://www.library.fa.ru/files/JEL.pdf> (date of access: 27.05.2020).

21. Fomov A.P. (2013) *Model' ucheta stepeni raskhozhdeniya ekspertnykh otsenok. Sb. nauch. trudov po materialam mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. Ch. 7* [Model for taking into account the degree of discrepancy between expert estimates. scientific. works based on materials of international scientific-practical. conf. Part 7] *ООО «Konsaltingovaya kompaniya Yukom»* [LLC «Consulting Company Ucom»]. Tambov.

22. Chernysheva T.V. (2008) *Model' mnogokriterial'noy otsenki ekspertov* [Model of multi-criteria assessment of experts] *Al'manakh sovremennoy nauki i obrazovaniya* [Almanac of modern science and education] *Gramota* [Diploma]. No. 9 (16). Tambov. P. 242–245.

DOI 10.35264/1996-2274-2020-2-65-79

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКСПЕРТИЗЫ НАУЧНЫХ ПРОЕКТОВ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ЭКСПЕРТОВ ФЕДЕРАЛЬНОГО РЕЕСТРА

Р.Р. Илющенко, нач. отдела ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, renaldi@extech.ru

Т.В. Осипова, вед. аналитик ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, osipovaty@extech.ru

Рецензент: Т.А. Яркова

Статья посвящена вопросам повышения точности экспертных оценок при организации экспертизы научно-технических и инновационных проектов в информационной системе Федерального реестра экспертов. Рассмотрены основные методы обработки экспертных оценок. Показано, что для экспертно-аналитических работ, выполняемых информационной системой Федерального реестра экспертов, оптимальным методом обработки экспертных оценок является их усреднение в рамках экспертных групп. Проведен анализ оценочных шкал типовых экспертных анкет, определены статистические характеристики экспертных оценок. Обоснован выбор лучшей групповой оценки для типовых схем экспертизы, в качестве которой предложено использовать среднее арифметическое частных оценок. Рассмотрены критерии принятия решения и пороговые значения экспертных оценок. Предложен способ повышения достоверности и точности экспертных оценок путем ранжирования оцениваемых показателей по степени их значимости с последующим формированием частной итоговой оценки проекта в виде взвешенной суммы.

Ключевые слова: экспертиза, экспертно-аналитическое исследование, экспертная группа, экспертная оценка, частная оценка, групповая оценка, средняя оценка, достоверность оценки, точность оценки, метод обработки оценок, экспертная анкета, оцениваемый показатель, критерий оценки, оценочная шкала, весовой коэффициент, среднее арифметическое, медиана, ранжировка.

PROCESSING OF EXPERT ESTIMATES WHEN CONDUCTING AN EXAMINATION OF SCIENTIFIC PROJECTS WITH THE INVOLVEMENT OF EXPERTS OF THE FEDERAL ROSTER

R.R. Ilyushchenko, Head of Department, SRI FRCEC, renaldi@extech.ru

T.V. Osipova, Leading Analyst, SRI FRCEC, osipovaty@extech.ru

The article is devoted to the issues of increasing the accuracy of expert assessments when organizing the examination of scientific, technological and innovative projects in the information system of the Federal Roster of Experts. The main methods of processing expert assessments are considered. It is shown that for expert and analytical work performed by the information system of the Federal Register of Experts, the optimal method for processing expert assessments is their averaging within expert groups. The analysis of the rating scales of typical expert questionnaires is carried out, the statistical characteristics of expert assessments are determined. The choice of the best group assessment for typical examination schemes is substantiated, as it is proposed to use the arithmetic mean of private assessments. The criteria for making a decision and the threshold values of expert assessments are considered. A method is proposed for increasing the reliability and accuracy of expert assessments by ranking the estimated indicators according to their degree of

significance with the subsequent formation of a private final assessment of the project in the form of a weighted sum.

Keywords: expert examination, expert-analytical research, expert group, expert assessment, private assessment, group assessment, average assessment, assessment reliability, assessment accuracy, assessment method, expert questionnaire, assessed indicator, assessment criterion, assessment scale, weight coefficient, arithmetic mean, median, ranking.

Введение

В практике экспертно-аналитических исследований (ЭАИ), проводимых с привлечением экспертов Федерального реестра экспертов научно-технической сферы (Реестр), экспертам приходится давать количественные и качественные оценки различным объектам экспертизы.

Под объектами экспертно-аналитических исследований (экспертизы) в области науки, технологий и техники (ОЭ) обычно понимают предложения или проекты по развитию научной, научно-технической и инновационной сфер, направления и тематику исследований и разработок, а также оценки состояния научно-технологического комплекса и результаты научно-технической деятельности. Конкретные объекты ЭАИ определяются их заказчиками по согласованию с экспертной организацией и/или организацией – оператором Реестра.

Совокупность критериев, показателей и оценочных шкал, по которым осуществляется экспертиза ОЭ, разрабатывается применительно к каждому виду ЭАИ и утверждается заказчиком экспертизы, в качестве которого, как правило, выступает Минобрнауки России.

Число критериев и показателей в анкете может варьироваться от нескольких единиц до нескольких десятков, причем в анкете они обычно объединяются в разделы. Сумма баллов по всем критериям (показателям) образует общую оценку ОЭ. Кроме того, в анкете могут присутствовать вопросы, требующие нечисловой оценки («да/нет», «соответствует/не соответствует», «имеется/отсутствует» и т. п.). Итоговое мнение об ОЭ эксперт также выражает в нечисловой форме («поддержка целесообразна/поддержка нецелесообразна»).

ОЭ обычно поступают на экспертизу пакетами, содержащими от нескольких десятков до нескольких сотен проектов различной тематики. Экспертиза выполняется экспертными группами (ЭГ), в которых эксперты работают параллельно и независимо друг от друга. В информационной системе Реестра (ИС ФРЭ) ЭГ формируются чаще всего в составе трех экспертов, при этом в рамках ЭАИ, в зависимости от числа подлежащих экспертизе проектов, может быть сформировано от нескольких десятков до нескольких сотен ЭГ.

Эксперт может одновременно входить в состав нескольких ЭГ, а одна и та же группа может выполнять экспертизу нескольких однотипных проектов. Состав ЭГ эксперту неизвестен, тем более исключено прямое общение между экспертами внутри группы. Каждый эксперт, работая в своем личном кабинете в ИС ФРЭ, имеет доступ только к экспертной анкете и материалам проектов, предложенных ему для оценки.

Данная форма организации ЭАИ позволяет избежать таких негативных явлений, как конформизм (стремление «подогнать» свою оценку под мнение большинства), давление авторитетом и возможность сговора. Несмотря на то что схема с тремя независимыми экспертами не является наилучшей с точки зрения достоверности итоговой оценки [1], она, тем не менее, применяется наиболее часто, поскольку предпочтительна по другим соображениям, в первую очередь временным и финансовым.

Формируемые из пулов Реестра ЭГ чаще всего оказываются неоднородными, т. е. составленными из экспертов разного уровня компетентности по отношению к оцениваемым проектам. Это объясняется рядом причин.

Во-первых, аккредитованные в Реестре эксперты представляют собой лишь часть научного сообщества, и вероятность того, что в Реестре найдется эксперт, вектор компетентно-

сти которого будет точно соответствовать научно-техническому профилю конкретного ОЭ, представляется крайне малой.

Во-вторых, существенную роль играет такой субъективный фактор, как отсутствие у эксперта возможности выполнить предложенную экспертизу в установленные сроки (занятость по работе, командировка, болезнь и т. п.), вследствие чего экспертное задание приходится предлагать менее компетентным экспертам из сформированного рейтингового списка.

Применяемые в настоящее время процедуры формирования экспертных пулов и групп [2] предполагают ранжирование экспертов в порядке убывания их компетентности, при этом проведение экспертизы предлагается в первую очередь экспертам, компетентность которых максимально близка к научно-техническому профилю ОЭ.

Наиболее неоднородными являются группы в тех ЭАИ, при организации которых используются автоматизированные процедуры подбора экспертов, как, например, в экспертизе конкурсных заявок на получение грантов Президента России молодым российским ученым — кандидатам наук, докторам наук и ведущим научным школам [3]. Следствием неоднородности ЭГ является расхождение экспертных оценок, часто весьма значительное. Стоит, однако, отметить, что данное явление наблюдается также и в сравнительно однородных группах, однако такие случаи редки, и в большинстве своем однородные ЭГ демонстрируют удовлетворительную согласованность оценок.

Если в результате экспертизы ОЭ от группы экспертов получены разные оценки, то возникает задача формирования итоговой оценки, которая может считаться мнением группы и должна быть представлена в сводном экспертном заключении. Выбор релевантного метода обработки частных экспертных оценок, обеспечивающего получение наилучшей (с точки зрения достоверности и точности) групповой оценки, может быть сделан на основе анализа особенностей ЭАИ, выполняемых в ИС ФРЭ, характеристик экспертных анкет и используемых в них измерительных шкал.

Методы обработки экспертных оценок

На сегодняшний день в научной литературе описаны различные методы обработки экспертных оценок, ни один из которых, к сожалению, нельзя признать универсальным. Основные широко используемые в настоящее время методы — это *проверка согласованности мнений* экспертов (или *классификация* экспертов, если нет согласованности) и *усреднение мнений* экспертов внутри согласованной группы [4]. В тех видах экспертизы, где ответы экспертов связаны с объектами нечисловой природы (градации качественных признаков, ранжировки, разбиения, результаты парных сравнений, нечеткие предпочтения и т. д.), для анализа применимы *методы нечисловой статистики* [5, 6].

Проверка согласованности мнений экспертов внутри группы

Данный метод применяется в целях выделения в экспертной группе одной или нескольких подгрупп, оценки которых совпадают или близки друг к другу. Если число экспертов, одинаково оценивших ОЭ, составляет большинство ЭГ, то их оценка принимается за мнение группы, а остальные (девиантные) оценки попросту отбрасываются. Данный подход подвергается справедливой критике рядом авторов, считающих, что в отношении экспертной оценки ОЭ (особенно научно-технических) нельзя безапелляционно утверждать, что «большинство всегда право». Поскольку неизвестно «истинное» значение оценки, которой заслуживает ОЭ, частная оценка, значительно отстоящая по шкале от других, может оказаться самой точной. На практике указанная проблема обычно решается путем проведения второго тура экспертизы с переводом ее в формат «круглого стола», особенно когда речь идет об оценке ОЭ, реализация которых связана с большими рисками или затратами. Экспертиза при этом может превращаться в научную дискуссию со всеми вытекающими последствиями, однако в итоге часто удается достигнуть консенсуса или же максимально сближить оценки.

Классификация экспертов

Классификация экспертов означает их ранжирование по «весу», для чего каждому эксперту, входящему в ЭГ, присваивается определенный ранг, количественно выражаемый весовым коэффициентом. В случае расхождения частных оценок применение метода классификации позволяет сформировать групповую оценку двумя способами:

- принятием в качестве групповой оценки эксперта, имеющего наивысший ранг;
- вычислением *средневзвешенной* оценки, получаемой путем корректировки частных оценок с учетом весовых коэффициентов экспертов и последующим усреднением этих оценок.

Главной трудностью при выборе данного метода является отсутствие научно обоснованных, лишенных субъективизма методик назначения экспертам весовых коэффициентов.

Простой механический подсчет количества научных публикаций, патентов, выполненных ранее научно-исследовательских работ, индексов цитируемости позволяет, в принципе, ранжировать экспертов по этим показателям, однако без их качественного анализа полученные рейтинги могут оказаться ошибочными. Анализ научных достижений экспертов помимо значительных временных затрат предъявляет высокие требования к профессиональной подготовке администраторов Реестра, предполагающей наличие глубоких знаний в различных областях науки, что на практике недостижимо.

Ранжирование экспертов на основе формальных признаков (ученая степень, звание, должность, награды и премии и т. п.) таит в себе определенный произвол и также чревато ошибками [7]. Другая проблема заключается в том, что сама идея корректировки экспертных оценок в сторону их завышения или занижения путем умножения на весовые коэффициенты экспертов представляется спорной. Очевидно, что задача поиска эффективных алгоритмов ранжирования экспертов на основе всей совокупности данных об эксперте, имеющих в распоряжении администраторов Реестра, актуальна и требует решения.

Усреднение мнений экспертов внутри группы

Усреднение является наиболее широко применяемым методом обработки частных оценок, при этом в качестве средней (групповой) оценки в зависимости от типа оценочной шкалы могут быть выбраны различные средние (мода, медиана, среднее арифметическое, среднее геометрическое, среднее гармоническое, среднее степенное или среднее по Колмогорову) частных оценок. Свойства средних оценок подробно описаны в соответствующей литературе и в настоящей статье не рассматриваются. Достаточно сказать, что все указанные средние оценки лежат между минимумом и максимумом из чисел имеющегося ряда. Для целей настоящего исследования наибольший интерес представляют две средние оценки: медиана и среднее арифметическое.

Медиана – такое число в числовом ряду, что половина из элементов ряда больше него, а другая половина – меньше. Например, для схемы экспертизы с тремя экспертами медианой является оценка, имеющая среднее значение из трех. Медиана – наилучшая (и единственная) средняя оценка в номинальных и порядковых шкалах качественных признаков. Для экспертных оценок, имеющих нечисловую природу, удобной средней оценкой является медиана Кемени – Снелла [8], часто называемая просто медианой Кемени. Медиана Кемени предложена в качестве средней оценки группы в тех случаях, когда частные оценки представляет собой не числа, а ранжировки, т. е. некоторые последовательности, упорядоченные экспертами по их предпочтениям. С математической точки зрения вычисление медианы Кемени является задачей целочисленного программирования и сводится к отысканию среди полученных от экспертов упорядочений такого, для которого сумма расстояний до оценок других экспертов будет минимальной. Найденное таким образом упорядочение и называют медианой Кемени.

Вычисление *среднего арифметического* частных оценок является самым простым способом получения средней оценки в том предположении, что частные оценки представляют собой случайные числа. Однако из теории [9] известно, что данная оценка является наилучшей только для случайной величины, имеющей нормальное (гауссово) распределение.

В тех же случаях, когда распределение случайной величины неизвестно, нельзя утверждать, что данная оценка будет наилучшей.

Экспертизы, выполняемые в ИС ФРЭ, имеют характерные особенности, к основным из которых относятся:

- малочисленность экспертных групп (максимум три человека), что обусловлено, главным образом, бюджетными ограничениями;
- проведение экспертизы в один этап;
- использование анкет, предполагающих «оцифровку» ответов эксперта и представление их в виде балльных оценок по показателям проекта и по проекту в целом;
- применение метода ранжирования экспертов только на этапе формирования ЭГ (присвоенные экспертам весовые коэффициенты не учитываются при обработке экспертных оценок; считается, что в рамках одной ЭГ все эксперты имеют одинаковый ранг).

Указанная специфика ЭАИ накладывает ограничения на выбор метода обработки экспертных оценок: малочисленность ЭГ не позволяет выделять в них согласованные подгруппы, а классификация экспертов также не находит применения по причинам, указанным выше.

Таким образом, усреднение мнений экспертов внутри ЭГ остается пока единственным методом обработки экспертных оценок, реализуемым на текущем этапе развития системы экспертиз Реестра.

Логика оценок, экспертные анкеты и оценочные шкалы

При выставлении оценок эксперт анализирует материалы ОЭ, включающие его формализованное описание и различные приложения справочного характера. В зависимости от уровня компетентности и под влиянием различных факторов случайного характера оценки эксперта могут иметь то или иное отклонение от «истинных» значений оцениваемых показателей. Разница между «истинным» значением показателя и его оценкой образует ошибку экспертизы.

Возникает вопрос: что считать «истинной» оценкой проекта?

С точки зрения традиционной логики, экспертная оценка является суждением, отражающим знания эксперта об оцениваемом ОЭ, и, как любое суждение, может быть истинной или ложной. В современной логике вместо термина «суждение» обычно используют термин «высказывание», обозначающий грамматически правильное предложение, взятое вместе с выражаемым им смыслом. В нашем случае мы имеем дело с особым типом высказываний, а именно – с *оценочными высказываниями*. Понятийно оценочные высказывания противопоставляются дескриптивным (описательным) высказываниям. Оценка является выражением ценностного отношения утверждения к объекту, противоположного описательному, или истинностному, отношению [10]. Логическая структура и логические связи оценочных высказываний изучаются *логикой оценок*, являющейся ветвью модальной логики и состоящей из логики абсолютных оценок и логики сравнительных оценок (логики предпочтений). Логика абсолютных оценок оперирует такими аксиологическими модальностями, как «хорошо», «плохо», «безразлично», в то время как логика предпочтений использует понятия «лучше», «хуже», «равноценно». Логика абсолютных оценок и логика предпочтений не сводимы друг к другу и являются самостоятельными разделами логики оценок. «Лучше» не определимо через «хорошо»: лучше один другого могут быть и два «хороших», и два «плохих» ОЭ.

Принципиально важным является то, что оценочное высказывание не является ни истинным, ни ложным. Истина характеризует отношения между описательным высказыванием и действительностью; оценки же не являются описаниями. Они могут характеризоваться как целесообразные, эффективные, разумные, обоснованные и т. п., но не как «истинные» или «ложные». Принимаемый логикой оценок *принцип Юма* отвергает выводимость оценок из описаний и описаний из оценок. Из этого следует вполне практический вывод: при обработке экспертных оценок ни одно экспертное мнение нельзя отбрасывать как заведомо неправильное, так же как и считать чье-то мнение единственно верным. Все оценки имеют право на существование и в этом смысле равноценны.

В соответствии с принципом *аксиологической полноты* поступающий на экспертизу ОЭ может быть «хорошим», «плохим» или «безразличным». Однако этот принцип справедлив только в случае предположения, что множество ОЭ, о ценности которых имеется определенное представление, совпадает с множеством всех ОЭ.

Очевидно, что, например, для заявок на выполнение научно-технических и инновационных проектов такое предположение не всегда оправданно, поскольку данные проекты ориентированы, как правило, на получение результатов, не существующих на момент проведения экспертизы. Не будет преувеличением сказать, что материалы таких заявок, дескриптивные по форме, по сути являются оценочными, поскольку отражают взгляды их авторов на результаты, планируемые к получению в будущем. В случае экспертизы научно-технических отчетов дело обстоит проще: здесь принцип *аксиологической полноты* соблюдается, и экспертная оценка может быть эффективной.

Другой принцип — принцип *аксиологической непротиворечивости* — требует внутренней непротиворечивости самой системы принятых оценок. Другими словами, противоречащие друг другу состояния не могут быть вместе «хорошими» или «плохими». К сожалению, реальные множества оценок, используемые в экспертных анкетах, нередко непоследовательны, что ставит в тупик экспертов и повышает вероятность экспертной ошибки. Например, в ряде экспертных анкет большая научная новизна результатов предусматривает и более высокие баллы, и в то же время высокие баллы выставляются за отсутствие рисков неполучения запланированных результатов. Здесь мы сталкиваемся с очевидным противоречием: известно, что проекты, в которых отсутствуют риски, как правило, не содержат новизны, и наоборот. Однако формально и те и другие проекты могут набрать одинаковое количество баллов, что вызовет трудности при определении лучшего из проектов.

Подлежащий экспертизе ОЭ, имеющий вид формализованного описания, с логической точки зрения есть набор дескриптивных высказываний, которые могут соответствовать или не соответствовать действительности, т. е. быть истинными или ложными. Задача эксперта заключается в проверке на основе своих компетенций истинности этих высказываний и выражении к ним своего ценностного отношения в виде оценочных высказываний по основаниям, устанавливаемым экспертной анкетой. В сложившейся экспертной практике возможные оценочные высказывания (ответы эксперта) «оцифровываются», т. е. каждому из них ставится в соответствие определенное количество баллов. Такая система оценки удобна при проведении конкурсов, когда из множества проектов необходимо выбрать лучшие для их последующей реализации.

Среди множества оценок, которые могут быть поставлены ОЭ по заданной измерительной шкале, существует оценка, наиболее точно характеризующая ОЭ. Эту гипотетическую оценку, значение которой неизвестно, мы условно и называем «истинной». Если бы имелась возможность привлечь к экспертизе проекта всех существующих специалистов в тематической области ОЭ, то полученное множество частных оценок представляло бы собой генеральную совокупность, по которой можно было бы определить теоретическое распределение оценки и его параметры. Тогда за «истинное» значение оценки можно было бы принять какую-либо характеристику *центра распределения* — моду, медиану или математическое ожидание [11]. Однако на практике оценку ОЭ приходится формировать по ограниченной выборке из генеральной совокупности, чаще всего по выборке, состоящей из трех элементов. При таком малом объеме выборки провести корректный статистический анализ в целях определения теоретического распределения оценки не представляется возможным.

Например, проверка по стандартным методикам ГОСТ Р 8.736–2011 гипотезы о нормальности распределения требует наличия выборки объемом как минимум 15 элементов [12].

Распределение итоговых экспертных оценок можно определить косвенным путем на основе анализа оценочных шкал, используемых в экспертных анкетах. В табл. 1 представлены оценочные шкалы некоторых типовых анкет, по которым с использованием ИС ФРЭ проводились ЭАИ в период 2014–2020 гг.

Таблица 1

Оценочные шкалы типовых экспертных анкет

Обозначение ЭАИ	Кол-во проектов	Объект экспертизы	Оцениваемые показатели	
			Кол-во	Шкала (баллы)
ЭАИ-1	99	Научно-исследовательские проекты, предлагаемые ведущими университетами Российской Федерации – участниками программы повышения конкурентоспособности вузов среди ведущих мировых научно-образовательных центров	1 14	0; 5 ¹ 0–5 ²
ЭАИ-2	412	Конкурсные заявки на реализацию проектов в рамках Федеральной целевой программы (ФЦП) «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», мероприятие 1.3	2 1 2	0–3 0–5 0–7
ЭАИ-3	122	Конкурсные заявки на реализацию проектов в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», мероприятие 1.4	2 3 2	0–2 0–3 0–5
ЭАИ-4	556	Проекты, отобранные для участия в конкурсе на финансирование в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», мероприятия 1.2–1.4	9 2 1 1 1	0–1 0–2 0–3 0–4 0–5
ЭАИ-5	31	Проекты, отобранные для участия в конкурсе на финансирование в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по мероприятиям 2.1, 2.2 (критерии 1, 2)	1 1 1 1 1 1 4 1	0–1 0–2 0–3 0; 2–3 0; 1; 2; 4 0; 2; 4 0; 3; 5 0; 3; 5; 8
ЭАИ-6	60	Проекты, заявленные на участие в конкурсном отборе на предоставление грантов на государственную поддержку центров национальной технологической инициативы на базе образовательных организаций высшего образования и научных организаций	1 7 1 9 4 7 1	0–1 0–2 0,5–2,0 0–3 0–4 0–5 1–5
ЭАИ-7	31	Проекты, отобранные для участия в конкурсе на финансирование в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по мероприятиям 2.1, 2.2 (критерий 3)	1 1 3 1 1 1 1 1 1	0–1 0–2 0; 1; 3 0; 1; 3; 5 0; 1; 2; 4; 5; 7 0; 2; 4; 5; 7 0; 2; 4 (+2) (+2) (+2) ³ 0; 1; 2; 4; 6; 8 0; 4 (+2) (+2) (+2)

¹ По этой шкале показатель может получить оценку 0 или 5 баллов.

² По этой шкале показатель может получить оценку от 0 до 5 баллов.

³ Элемент шкалы (+2) означает, что если поставлена оценка 4 балла, то эксперт может трижды добавить к ней дополнительно по 2 балла при соответствии проекта определенным условиям.

Продолжение таблицы 1

Обозначение ЭАИ	Кол-во проектов	Объект экспертизы	Оцениваемые показатели	
			Кол-во	Шкала (баллы)
ЭАИ-8	1730	Отчеты о результативности научной деятельности за 5 лет организаций, подведомственных Минобрнауки России	1	0; 5; 10
			2	0; 5; 15
			1	0; 5; 15; 20; 30
			1	0; 5; 15; 30
			1	0; 5; 20; 30 (+10)
			1	0; 10; 15
			1	0; 10; 15 (+5)
			1	0; 10; 15 (+10)
			2	0; 10; 20 (+10)
ЭАИ-9	1661	Проекты, заявленные на конкурс на получение грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых	1	0; 1 (+1) (+1) (+2)
			1	0; 1; 5 (+5)
			1	0; 1; 5; 10; 20 (+5) (+5)
			1	0; 2 (+3)
			1	0; 2; 5 (+3) (+7)
			1	0; 5 (+5) (+5)
			1	0; 10
ЭАИ-10	132	Конкурсные заявки на соискание стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики	1	0; 0,7; 1,0
			1	0,5; 1,0
			2	1–5
			1	1–7
			1	1–8
			1	1–10
			1	1–15
			1	1–20
ЭАИ-11	913	Отчетные материалов получателей грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых	1	0; 1; 5; 20 (+5) (+5)
			1	0; 5
			1	0; 5 (+5) (+5)
			1	0; 5 (+10)
			1	0; 5; 15
			1	0; 6; (+1) (+1) (+2)
			1	0; 10
ЭАИ-12	110	Конкурсные заявки в рамках реализации мероприятия «Обучение граждан по программам непрерывного образования в образовательных организациях, реализующих дополнительные образовательные программы и программы профессионального обучения» Федерального проекта «Новые возможности для каждого» Национального проекта «Образование»	1	0; 10
			6	0; 20
			5	0; 30
			4	0; 50
			2	0; 100
			2	0; 200
ЭАИ-13	75	Конкурсные заявки в рамках реализации мероприятия «Формирование программы поддержки и развития образования по референтным группам стран-партнеров и территориально-отраслевым сегментам мирового рынка с целью эффективного обеспечения высококвалифицированными кадрами экспортно-ориентированных секторов российской экономики» Федерального проекта «Экспорт образования» Национального проекта «Образование» в 2019 году»	16	0; 5
			5	0; 7
			10	0; 10
			2	0; 17
			2	0; 18
			2	0; 20
			1	0; 30
			1	0; 35

Окончание таблицы 1

Обозначение ЭАИ	Кол-во проектов	Объект экспертизы	Оцениваемые показатели	
			Кол-во	Шкала (баллы)
ЭАИ-14	141	Конкурсные заявки на право получения грантов Президента Российской Федерации ведущим научным школам в 2020 г.	1	0; 1; 5; 10; 20 (+5) (+5)
			1	0; 1; 5 (+5) (+5)
			1	0; 2 (+3) (+5)
			1	0; 2; 5 (+3) (+7)
			1	0; 5
			1	0; 5 (+5) (+5)
			1	0; 10
ЭАИ-15	14	Представления на соискание Премии союзного государства в области науки и техники российским и белорусским ученым и специалистам	3	0; 1; 3
			1	0; 2; 3
			1	0; 2; 3; 4; 5
			4	0; 3; 5
			1	0; 5
ЭАИ-16	269	Конкурсные заявки на получение персональных стипендий им. Ж.И. Алферова для молодых ученых в области физики и нанотехнологий	1	0; 5 (+2) (+3)
			1	0; 5 (+5)
			2	0; 5 (+10)
			1	0; 5; 10
			1	0; 5; 15 (+10) (+5) (+5)
			1	(+5)

Как видно из табл. 1, экспертные анкеты содержат от 5 до 30 и более показателей, а оценочные шкалы содержат от 2 до 7 значений. Для облегчения работы экспертов анкеты составляются таким образом, что, оценивая тот или иной показатель, эксперт должен выбрать из списка один или несколько возможных вариантов ответа, каждому из которых поставлено в соответствие определенное количество баллов (рис. 1).

1. ОПЫТ И ДОСТИЖЕНИЯ СОИСКАТЕЛЯ В НАУЧНОМ НАПРАВЛЕНИИ ПРОЕКТА
(за 3 года, предшествующих году проведения конкурса)

1.1. Опыт участия соискателя в научных исследованиях

Наличие завершенных научных и научно-исследовательских работ с участием соискателя

☐ 0 - Отсутствуют научные работы, в которых соискатель является исполнителем, либо оценка затруднена

☐ 1 - Представлены сведения менее, чем о пяти НИР или НИОКТР, в которых соискатель является исполнителем

☒ 5 - Представлены сведения о пяти и более НИР или НИОКТР, в которых соискатель является исполнителем

☒ +5 - Представлены сведения о НИР и НИОКТР, в которых соискатель является научным руководителем или ответственным исполнителем

Рис. 1. Фрагмент анкеты с «оцифрованными» вариантами ответа

Шкалы отличаются многообразием даже в пределах одной экспертной анкеты, при этом устанавливаемые в них значения (баллы) свидетельствуют о достаточно произвольном подходе к «оцифровке» ответов на вопросы анкеты. По своему типу используемые в анкетах

шкалы являются порядковыми, а оценки по показателям представляют собой дискретные величины. Поскольку невозможно заранее указать, какую оценку поставит тот или иной эксперт по тому или иному показателю, можно считать данные оценки дискретными случайными величинами и применять для их анализа методы теории вероятностей и математической статистики.

В примере, приведенном на рис. 1, оцениваемым показателем является опыт участия соискателя в научных исследованиях, а критерием оценки — наличие научных и научно-исследовательских работ с участием соискателя и их количество за последние три года. Видно, что использованная для оценки данного показателя измерительная шкала является порядковой, значения в ней расположены по возрастанию, а единица измерения — балл. Производить какие-либо арифметические действия с элементами шкалы, например вычислять соотношения или разности, с логической точки зрения не имеет смысла. Например, соискатель, участвовавший в качестве исполнителя в четырех научно-исследовательских работах (НИР), получит по данной анкете оценку в 1 балл, а исполнитель пяти НИР — уже 5 баллов. Но это не означает, что последний в 5 раз лучше первого. Разница в оценках этих соискателей составляет 4 балла, но точно такая же разница была бы в случае, если бы второй соискатель принял участие в выполнении не 5, а, например, 15 НИР. По логике анкеты также выходит, что заявитель, выполнивший в качестве научного руководителя одну НИР, и научный руководитель четырех НИР равноценны (оба получают по 6 баллов), что, очевидно, нельзя признать правильным. Подобные нестыковки, к сожалению, встречаются в экспертных анкетах довольно часто, и рассмотренный пример показывает, что абстрактные количественные оценки не всегда точно отражают измеряемые характеристики объекта экспертизы.

В 2013 г. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ была предпринята попытка использовать при проведении экспертизы научных проектов нечисловые показатели. Для этой цели была разработана экспертная анкета (рис. 2), в которой для оценки проекта использовались биполярные шкалы качественных признаков: «соответствует/не соответствует»; «да/нет»; «скорее да, чем нет/скорее нет, чем да»; «имеется/отсутствует» и т. д. Анкета прошла апробацию в двух тестовых ЭАИ (5 и 20 проектов соответственно) и получила положительные отзывы экспертов, участвовавших в ее тестировании. Новшеством являлось также то, что после заполнения анкеты экспертное заключение формировалось автоматически в виде связного текста, что облегчало работу экспертов и сокращало общее время экспертизы. Однако идея не получила дальнейшего развития. Связано это было с тем, что на этапе принятия решения проекты, рекомендованные экспертами к поддержке, приходилось вновь рассматривать и каким-то образом рейтинговать в целях выбора из них лучших. В отсутствие количественных оценок сделать это было крайне сложно. Поэтому начиная с 2014 г. при проведении ЭАИ стала вновь применяться и применяется по настоящее время балльная система оценок.

Многообразие используемых в анкетах оценочных шкал определяется, главным образом, спецификой конкретных ЭАИ, и универсального решения до настоящего времени здесь нет. Однако задача разработки для типовых видов экспертизы стандартизованных анкет, использующих оценочные шкалы, основанные на интуитивно понятной метрике, давно назрела.

Статистические характеристики экспертных оценок

В предыдущем параграфе было показано, что оценки по каждому показателю экспертной анкеты можно рассматривать как дискретные случайные величины с неизвестными в общем случае законами распределения. Выяснение этих законов и их параметров невозможно ввиду малых объемов выборок. Однако поскольку сумма оценок по всем показателям образует общую оценку ОЭ в баллах, то согласно тереме Ляпунова эта общая оценка также есть случайное число, которое, приняв в качестве допущения независимость оценок по показателям, можно уверенно считать распределенным нормально [13]. Данный вывод позволяет однозначно выбрать наилучшую среднюю оценку ОЭ, которую можно считать мнением ЭГ.

Из теории обработки наблюдений [14] известно, что наилучшей точечной оценкой наиболее вероятного значения наблюдаемой величины x , полученной по нормально распределенной выборке $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$, является выборочное среднее $x_{\text{ср}}$, определяемое по формуле:

$$x_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x. \quad (1)$$

Следовательно, наилучшей групповой оценкой ОЭ будет среднее арифметическое частных оценок. Необходимо подчеркнуть, что вычислять подобным образом средние оценки по отдельным показателям нельзя, так как в порядковой шкале в качестве средних можно использовать только члены вариационного ряда, в частности медиану, но нельзя использовать среднее геометрическое, среднее арифметическое и т. д. В количественных шкалах из всех обобщенных средних по А.Н. Колмогорову можно использовать: в шкале интервалов – только среднее арифметическое, а в шкале отношений – только степенные средние [6].

Оценка экономических показателей предлагаемой НИР
Соответствует ли заявленная стоимость НИР объему и сложности предполагаемых работ?
Заявленная стоимость НИР: 4,3 млн.руб.
<input type="radio"/> да <input type="radio"/> нет <input checked="" type="radio"/> оценка затруднена
Соответствует ли заявленная продолжительность НИР объему и сложности предполагаемых работ?
Заявленная продолжительность НИР: 4 года
<input type="radio"/> да <input checked="" type="radio"/> нет приведите Вашу оценку продолжительности НИР (лет) 2-3 года
<input type="radio"/> оценка затруднена
Как Вы оцениваете перспективы коммерциализации результатов НИР?
<input type="radio"/> коммерциализация возможна в краткосрочной перспективе (2-3 года) <input checked="" type="radio"/> коммерциализация возможна в среднесрочной перспективе (4-6 лет)

Рис. 2. Фрагмент экспертной анкеты, использующей нечисловые оценочные шкалы

Вычисленная по формуле (1) средняя оценка ОЭ ни в коей мере не может считаться его «истинной» оценкой или даже максимально к ней близкой. Все элементы выборки (частные оценки) могут оказаться далеко отстоящими от гипотетического «истинного» значения и находиться как в зоне недооценки, так и в зоне переоценки. По полученной выборке можно лишь утверждать, что, по мнению данной ЭГ, наиболее вероятным значением оценки ОЭ

является $x_{\text{ср}}$. Также можно утверждать, что при увеличении объема выборки, т.е. при увеличении численности ЭГ, средняя оценка будет приближаться к своему наиболее вероятному значению – математическому ожиданию.

Кроме среднего значения по выборке можно также определить среднеквадратическое отклонение экспертной оценки, характеризующее расхождение мнений экспертов внутри ЭГ. Несмещенная оценка среднеквадратического отклонения величины $x_{\text{ср}}$ определяется по формуле Бесселя:

$$s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{ср}})^2} . \quad (2)$$

Рассчитанные по формулам (1)–(2) статистические характеристики экспертных оценок, полученных группами из трех экспертов в некоторых видах ЭАИ, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Статистические характеристики экспертных оценок

Обозначение			Экспертные оценки, балл			Статистические характеристики оценок	
ЭАИ	Группа	Проект	Эксперт 1	Эксперт 2	Эксперт 3	$x_{\text{ср}}$	s
ЭАИ-1	ЭГ-1	П1.1	69	50	66	61,7	5,9
		П1.2	51	70	59	60,0	5,5
	ЭГ-2	П2.1	80	70	67	72,3	3,9
		П2.2	77	80	78	78,3	0,9
	ЭГ-3	П3.1	52	55	75	60,7	7,2
		П3.2	56	47	78	60,3	9,2
ЭАИ-6	ЭГ-4	П4.1	36	89	52	59,0	15,7
		П4.2	62,5	83,5	81,5	75,8	6,7
		П4.3	73	40	67	60,0	10,1
ЭАИ-9	ЭГ-5	П5.1	83	68	73	74,7	4,4
		П5.2	62	52	62	58,7	3,3
	ЭГ-6	П6.1	75	96	55	75,3	11,8
		П6.2	86	89	22	65,7	21,9
		П6.3	65	65	28	52,7	12,3
	ЭГ-7	П7.1	88	88	85	87,0	1,0
	ЭГ-8	П8.1	84	79	84	82,3	1,7
		П8.2	46	43	30	39,7	4,9
	ЭГ-9	П9.1	84	78	77	79,7	2,2
		П9.2	79	74	78	77,0	1,5
	ЭГ-10	П10.1	94	36	81	70,3	17,6
		П10.2	87	41	80	69,3	14,3
		П10.3	29	41	56	42,0	7,8
	ЭГ-11	П11.1	89	81	81	83,7	2,7
		П11.2	81	84	81	82,0	1,0
ЭАИ-11	ЭГ-12	П12.1	45	15	36	32,0	8,9
		П12.2	35	47	31	37,7	4,8

Видно, что математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение экспертных оценок переменны не только для разных экспертных анкет, но даже и в рамках одного ЭАИ для разных пар «экспертная группа – проект». Кроме того, не наблюдается видимой корреляции между оценками, поставленными разным ОЭ одними и теми же экспертами. Другими словами, по выборке невозможно определить, кто из входящих в ЭГ экспертов дал более точную оценку. В экспертной группе ЭГ-4 оценки «эксперта 3» являются медианами во всех трех выборках, однако это, скорее всего, случайность, так как в других группах подобная закономерность не прослеживается.

Критерии принятия решения и пороговые значения оценок

Рассмотрим критерии принятия решения и пороговые значения оценок ЭО на примере научно-технических проектов.

Оценивая проект, эксперт руководствуется определенными критериями, которые так же, как и показатели, устанавливаются экспертной анкетой. Если под показателем понимается какое-либо свойство проекта, измеримое по заданной шкале, то критерий – это правило, в соответствии с которым показатель получает ту или иную оценку. Типичным критерием является «наличие и достаточность» чего-либо, относящегося к характеристикам проекта. Это могут быть научная новизна, квалификация и опыт исполнителей, научно-технический задел, лабораторно-исследовательская база и т. п. В других случаях критерием может выступать достижение или недостижение показателем некоторого порогового значения.

В процессе выполнения ЭАИ одним из часто задаваемых экспертами вопросов является вопрос о так называемом проходном балле, т. е. о пороговом значении суммарной оценки, выше которого проект может считаться «хорошим» и рекомендоваться к реализации. По сложившейся традиции считается, что, если проект набрал больше половины максимально возможного количества баллов, его целесообразно скорее поддержать, чем отклонить. Однако здесь имеется подводный камень: если в пределах анкеты оцениваемые показатели (группы показателей) имеют одинаковую значимость, то набрать 50 % и более баллов может проект, имеющий одновременно максимально высокие баллы по одним показателям и «нулевые» или близкие к ним – по другим. Избежать подобных перекосов можно двумя способами:

- введением требования о равномерности достижения 50%-го порога всеми группами показателей;
- ранжированием показателей по степени важности (значимости) с назначением им весовых коэффициентов.

В последнем случае итоговая оценка проекта представляется *взвешенной суммой*, слагаемыми которой являются оценки по показателям, умноженные на соответствующие весовые коэффициенты этих показателей. Весовые коэффициенты показателям (группам показателей) могут устанавливаться при составлении экспертных анкет до начала ЭАИ, однако нужно учитывать то обстоятельство, что степень важности тех или иных показателей может различаться для проектов, тематически относящихся к различным областям науки и техники. В связи с этим представляется целесообразным оставить решение данного вопроса на усмотрение самих экспертов, участвующих в ЭАИ.

В простейшем случае можно предложить экспертам просто упорядочить показатели (группы показателей) в убывающем порядке по степени их важности. Полученные таким образом упорядочения (ранжировки) могут различаться, в связи с чем возникает задача нахождения «среднего» упорядочения, которое можно считать мнением ЭГ. Таким упорядочением будет являться медиана Кемени, которую можно вычислить одним из известных методов (венгерский метод, метод ветвей и границ). Используя найденное «среднее» упорядочение и присвоив его элементам весовые коэффициенты, можно затем пересчитать все оценки по отдельным показателям и получить итоговые оценки проекта как взвешенные суммы частных оценок. Данные оценки, на наш взгляд, будут более точными, чем простые суммы, что в конечном счете повысит эффективность экспертизы.

Заключение

Повышение достоверности и точности результатов экспертизы различных типов ОЭ, в том числе научно-технических и инновационных проектов, является актуальной задачей, решение которой достигается комплексом организационно-технических мер, включающих, в частности, применение научно обоснованных методов обработки экспертных оценок.

Особенностями ЭАИ, организуемых ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ по заданиям Минобрнауки России, являются: пакетный характер экспертных заданий; большой объем пакетов (до нескольких сотен проектов), жестко фиксированные сроки, отводимые на экспертизу; проведение экспертизы в один этап; использование преимущественно балльной системы оценок. С учетом этого, а также исходя из временных и финансовых ограничений, наиболее удобной формой организации экспертизы в ИС ФРЭ является формирование экспертных групп в составе трех экспертов, работающих независимо друг от друга, с последующей обработкой экспертных оценок и формированием итоговых (сводных) экспертных заключений.

Используемые в экспертных анкетах оценочные шкалы являются порядковыми, предусматривающими оценку отдельных показателей проекта и проекта в целом в баллах. Анализ экспертных анкет показал, что требуется дальнейшее совершенствование оценочных шкал по ряду показателей в целях устранения неоднозначности оценок, выставляемых по этим показателям.

Получаемые в результате работы экспертных групп суммарные оценки проектов представляют собой нормально распределенные случайные числа, в связи с чем наилучшей средней оценкой, отражающей мнение экспертной группы, является среднее арифметическое частных оценок. Повысить точность экспертных оценок можно путем увеличения численности экспертных групп, для чего целесообразно рассмотреть различные формы привлечения к экспертизе максимально возможного числа экспертов, обладающих требуемыми компетенциями.

Необходимо продолжение исследований по уточнению критериев оценки проектов по отдельным показателям, изучение вопроса целесообразности ранжирования показателей (групп показателей) по степени их важности для получения более точных и достоверных экспертных оценок.

Статья подготовлена в рамках научно-исследовательской работы, проводимой ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ по государственному заданию № 075-01394-20-02 на 2020 г. Министерства образования и науки Российской Федерации в сфере экспертизы по проекту 730000Ф.99.1. БВ15АА00003.

Список литературы

1. Илющенко Р.Р., Мельник П.Б. Достоверность экспертных оценок при проведении экспертизы научно-технических и инновационных проектов в информационной системе Федерального реестра экспертов // Инноватика и экспертиза. 2020. № 1 (29). С. 46–58.
2. Мельник П.Б. Методика формирования экспертных пулов и групп для проведения экспертно-аналитических исследований // Инноватика и экспертиза. 2017. № 1 (19). С. 39–54.
3. Миронов Н.А., Марышев Е.А., Дивуева Н.А. Новые подходы к организационно-техническому обеспечению экспертизы конкурсных заявок на получение государственной поддержки в виде грантов Президента Российской Федерации молодым российским ученым – кандидатам и докторам наук и ведущим научным школам // Инноватика и экспертиза. 2020 г. № 1 (29). С. 59–67.
4. Панкова Л.А., Петровский А.М., Шнейдерман М.В. Организация экспертизы и анализ экспертной информации. М.: Наука, 1984.
5. Орлов А.И. Экспертные оценки // Заводская лаборатория. 1996. № 1. Т. 62. С. 54–60.
6. Орлов А.И. Нечисловая статистика. М.: МЗ-Пресс, 2004. С. 513.
7. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений / пер с нем.: Н.В. Васильченко, В.А. Душский. М.: Мир, 1990. С. 208.
8. Кемени Дж., Снелл Дж. Кибернетическое моделирование. Некоторые приложения / пер. Б.Г. Миркин. М.: Советское радио, 1972.

9. Бочаров П.П., Печинкин А.В. Математическая статистика: учеб. пособие. М.: РУДН, 1994.
10. Горский Д.П., Ивин А.А., Никифоров А.Л. Краткий словарь по логике / под ред. Д.П. Горского. М.: Просвещение, 1991. С. 208.
11. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. Киев: Техніка, 1975.
12. ГОСТ Р 8.736–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. М., 2019. ОКС 17.020, ОКСТУ 0008.
13. Прохоров Ю.В. Математический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1988.
14. Большаков В.Д. Теория ошибок наблюдений с основами теории вероятностей. М.: Недра, 1965.

References

1. Ilyushchenko R.R., Melnik P.B. (2020) *Dostovernost' ekspertnykh otsenok pri provedenii ekspertizy nauchno-tekhnicheskikh i innovatsionnykh projektov v informatsionnoy sisteme Federal'nogo reestra ekspertov* [The reliability of expert assessments in the examination of scientific, technological and innovative projects in the information system of the Federal Roster of Experts] *Innovatika i ekspertiza* [Innovation and Expert Examination]. No. 1 (29). P. 46–58.
2. Melnik P.B. (2017) *Metodika formirovaniya ekspertnykh pulov i grupp dlya provedeniya ekspertno-analiticheskikh issledovaniy* [Methodology for the formation of expert pools and groups for expert and analytical research] *Innovatika i ekspertiza* [Innovation and Expert Examination]. No. 1 (19). P. 39–54.
3. Mironov N.A., Maryshev E.A., Divueva N.A. (2020) *Novye podkhody k organizatsionno-tekhnicheskomu obespecheniyu ekspertizy konkursnykh zayavok na poluchenie gosudarstvennoy podderzhki v vide grantov Prezidenta Rossiyskoy Federatsii molodym rossiyskim uchenym – kandidatam i doktoram nauk i vedushchim nauchnym shkolam* [New approaches to the organizational and technical support of the examination of competition applications for receiving state support in the form of grants from the President of the Russian Federation to young Russian scientists – Doctors and Ph.D.-s and leading scientific schools] *Innovatika i ekspertiza* [Innovation and Expert Examination]. No. 1 (29). P. 59–67.
4. Pankova L.A., Petrovsky A.M., Shneiderman M.V. (1984) *Organizatsiya ekspertizy i analiz ekspertnoy informatsii* [Organization of expert examination and analysis of expert information] *Nauka* [Nauka]. Moscow.
5. Orlov A.I. (1996) *Ekspertnye otsenki* [Expert estimates] *Zavodskaya laboratoriya* [Factory laboratory]. No. 1. T. 62. P. 54–60.
6. Orlov A.I. (2004) *Nechislovaya statistika* [Non-numeric statistics] *MZ-Press* [MZ-Press]. Moscow. P. 513.
7. Mushik E., Muller P. (1990) *Metody prinyatiya tekhnicheskikh resheniy. Per s nem. N.V. Vasil'chenko, V.A. Dushskiy* [Methods of making technical decisions. Translated from German: N.V. Vasilchenko, V.A. Dushsky] *Mir* [Mir]. Moscow. P. 208.
8. Kemeny J., Snell J. (1972) *Kiberneticheskoe modelirovanie. Nekotorye prilozheniya. Per. B.G. Mirkin*. [Cybernetic modeling. Some applications. Translated by B.G. Mirkin] *Sovetskoe radio* [Soviet radio]. Moscow.
9. Bocharov P.P., Pechinkin A.V. (1994) *Matematicheskaya statistika: ucheb. posobie* [Mathematical statistics: textbook] *RUDN* [RUDN]. Moscow.
10. Gorskiy D.P., Ivin A.A., Nikiforov A.L. (1991) *Kratkiy slovar' po logike. Pod red. D.P. Gorskogo* [A short dictionary of logic. Ed. D.P. Gorsky] *Prosveshchenie* [Education]. Moscow. P. 208.
11. Sigorskiy V.P. (1975) *Matematicheskii apparat inzhenera* [Engineer's mathematical apparatus] *Tekhnika* [Technika]. Kiev.
12. GOST R 8.736–2011. (2019) *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Izmereniya pryamye mnogokratnye. Metody obrabotki rezul'tatov izmereniy. Osnovnye polozheniya* [State system for ensuring uniformity of measurements. Multiple direct measurements. Methods for processing measurement results. Basic provisions] *OKS 17.020, OKSTU 0008*. Moscow.
13. Prokhorov Yu.V. (1988) *Matematicheskii entsiklopedicheskiy slovar'* [Mathematical encyclopedic dictionary] *Sovetskaya entsiklopediya* [Soviet Encyclopedia]. Moscow.
14. Bolshakov V.D. (1965) *Teoriya oshibok nablyudeniya s osnovami teorii veroyatnostey* [The theory of observation errors with the foundations of the theory of probability] *Nedra* [NEDRA]. Moscow.

DOI 10.35264/1996-2274-2020-2-80-95

АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ ОБСУЖДЕНИЯ ЗАКОНА О НАУКЕ

Ю.Н. Андреев, ст. научн. сотр. ФГБУ НИИ РИЭПП, канд. экон. наук, y.andreev@riep.ru

Рецензент: И.Е. Ильина

В статье дается анализ материалов обсуждения законопроекта о науке и научной деятельности, организованного Минобрнауки России. Предложения участников обсуждения фактически относятся не столько к тексту законопроекта, сколько к содержанию государственной политики в научной сфере. По мере необходимости привлекаются другие источники по этому вопросу. Целью исследования было изучение представлений научного сообщества о проблемах государственной научной политики на основе предложений, поступивших в ходе обсуждения нового законопроекта о научной деятельности. При всей противоречивости и разнонаправленности мнений участников обсуждения обзор этих материалов позволяет выявить интересы участников научной деятельности, пробелы в законопроекте, обусловленные отсутствием анализа правовых и экономических аспектов тех отношений, которые должен регулировать новый закон. В статье выделены основные темы обсуждения и проведен правовой и экономический анализ высказываемых мнений и предложений.

Ключевые слова: закон о науке, государственная политика в научной сфере, субъекты научной политики, экономика и право в научной сфере, наукометрия.

ANALYSIS OF THE MATERIALS OF THE DISCUSSION OF THE LAW ON SCIENCE

Yu. N. Andreev, Senior Researcher, RIEPP Research Institute, Doctor of Economics,

y.andreev@riep.ru

The article analyzes the materials of the discussion of the draft law on science and scientific activity, organized by the Ministry of Education and Science of Russia. The proposals of the participants in the discussion actually relate not so much to the text of the draft law as to the content of state policy in the scientific sphere. Other sources on this issue are involved as necessary. The aim of the article was to study the views of the scientific community about the problems of state scientific policy on the basis of proposals received during the discussion of a new draft law on scientific activity. For all the contradictory and multidirectional opinions of the participants in the discussion, a review of these materials allows us to identify the interests of participants in scientific activities, gaps in the draft law due to the lack of analysis of the legal and economic aspects of those relations that should be regulated by the new law. The article highlights the main topics of discussion and provides a legal and economic analysis of the expressed opinions and proposals.

Keywords: law on science, state policy in the scientific sphere, subjects of scientific policy, economics and law in the scientific sphere, scientometrics.

Введение

На сайте [3] Минобрнауки России [URL: <https://www.preobra.ru/nauka>¹ (дата обращения: 05.08.2020)] в 2019 г. были размещены материалы обсуждения законопроекта о научной деятельности. Характерной чертой предложений участников является то, что они в подавляю-

¹ Далее ссылки на материалы обсуждений даются с указанием номера источника и названия предложения, как оно отмечено на сайте.

щем большинстве относятся не к тексту законопроекта, а к реальной государственной политике. Кроме того, в предложениях участников обсуждения законопроекта преобладает конструктивный подход, в результате чего становится возможным не только выявить проблемы, но и получить представление о предлагаемых путях их решения.

Предложения разделены на группы по основной тематике, при этом учтено, что многие предложения имеют отношение к тематике сразу нескольких групп, и к основному списку предложений группы добавлены указания на относящиеся к теме предложения из других групп. В результате возникает возможность рассматривать тематику разных групп как аспекты единой системы, в центре которой, судя по количеству откликов, находится проблема наукометрии. При анализе поднимаемых участниками обсуждения вопросов привлекались также и другие источники по сходной тематике, что позволило максимально учесть аргументацию авторов, занимающих разные позиции.

Наибольшее внимание участников обсуждения законопроекта и государственной политики в научной сфере в целом в настоящее время привлечено к теме наукометрии, что связано и с появлением Приказа Минобрнауки о новой методике оценки результативности научных организаций [11]. Обсуждение роли наукометрии выводит на связанные темы об оплате труда научных работников, на вопросы свободы научного творчества, на оценку социальной значимости научной деятельности и на определение самих субъектов научной деятельности. По этой причине в статье материалы обсуждения рассматриваются не по группам, представленным в источнике [3], а по проблемам построения закона, т. е. от целей закона к значимости научной деятельности и далее к обоснованию понятий ученого и научного работника.

Цели исследования

Целью проведенного исследования был анализ вопросов, рассмотренных в обсуждении законопроекта о научной деятельности, с точки зрения права, экономики и политики. Анализ проблем закона и государственной политики с позиций правовой и экономической науки позволяет преодолеть тупики, возникающие из-за попыток построить закон только на основе технологических определений, из-за чего возникают проблемы слабой связи аргументации и положений закона с экономическим законодательством страны. Необходимо выйти за пределы аксиоматических определений и взглянуть на проблемы научной сферы с позиций гражданского законодательства.

Методы исследования

Выбор методов исследования предопределен самим характером изучаемого материала. Каждый автор рассматривает либо частные вопросы, либо несколько взаимосвязанных вопросов без изучения общего фона. Из этого следует необходимость построения иерархической модели комплекса проблем, приближенной к структуре закона. В этом случае будет возможным учет факта соподчиненности проблем и принимаемых решений.

При выборе способов решения проблем участники обсуждения опираются чаще всего на собственные интересы, но в силу несовпадения интересов участников научной деятельности, потребителей результатов научной деятельности и интересов общества, финансирующего научную деятельность, аргументация авторов не может быть принята основой правового решения без учета социальных и экономических связей между заинтересованными сторонами. По этой причине в качестве метода анализа конкретных проблем и обоснования решений принят метод выявления реальных экономических отношений, возникающих между участниками научной деятельности и обществом в целом. Как и в гражданском законодательстве, положения закона о науке не могут быть устойчивыми и эффективными, если они не будут опираться на реальные экономические отношения. В данном случае это отношения между участниками научной деятельности и работодателями, между научными организациями и обществом и т. д.

Проблемы

Цели законопроекта и государственной политики

Большинство предложений и замечаний по законопроекту представляют собой реакцию на отдельные положения в тексте законопроекта. Но некоторые авторы обратили внимание на то важное обстоятельство, что без преамбулы, определяющей цель законопроекта в рамках государственной политики, невозможно оценить и положения законопроекта с точки зрения их соответствия целям, которые государство ставит перед собой и научным сообществом и для достижения которых разрабатывается весь механизм регулирования отношений. В отсутствие формулировки цели каждый участник исходит из собственных интересов и своего понимания целей закона. Как правило, цель закона участники понимают как формулировку перечня условий поддержки научной деятельности и пытаются расширить круг обязательств государства. Обозначенная в явном виде цель стала бы критерием отбора предложений и выбора редакции положений.

В группе предложений под названием «Систематизация законодательства» имеется предложение: «В законопроекте отсутствуют нормы, определяющие содержание государственной политики Российской Федерации в сфере научной, научно-технической деятельности... Из системного толкования положений главы 1 законопроекта усматривается, что основной целью закона является исключительно государственное регулирование научной, научно-технической деятельности, при этом цель государственного регулирования указанных видов экономической деятельности (создание условий для их развития или введение ограничений с целью обеспечения конституционно значимых интересов общества) в законопроекте не определена»². Эту идею развивает предложение в той же группе³, где отмечено, что в тексте законопроекта размыто различие между целями и средствами их достижения: «Из текста документа непонятно, что из себя представляют «государственные гарантии», и почему их установление является целью, а не задачей НТ-политики... Защита прав на интеллектуальную собственность не должна быть целью, это лишь средство». В Конституции Китая непосредственно упоминается обязательство государства использовать результаты научной деятельности как фактор роста производительных сил страны.

Вопрос о цели государственной политики в научной сфере становится особенно острым при обсуждении проводимой государством линии оценки результатов научной деятельности с помощью наукометрии. Мнения участников по вопросу о роли наукометрии противоположны: от предложений по дальнейшему развитию до резко критических оценок. Стала очевидной необходимость использования принимаемого всеми критерия — им может быть только изложение цели государственной политики в науке, инструментом которой является применение наукометрии. Смысл многих предложений сводится к тому, что метод внешнего управления научной деятельностью с помощью оценок результативности — не единственно возможный. Более продуктивным было бы реализовать комплекс мер, способствующих повышению эффективности научных исследований и использования результатов. Текст преамбулы должен ясно обозначить политический выбор между ставкой на внешние стимулы и ставкой на продуктивное сотрудничество государства с учеными, и в зависимости от этого выбора будут строиться отношения по частным вопросам.

Научная деятельность

В законопроекте научная деятельность традиционно определена как деятельность, имеющая целью получение знаний, т. е. определена технологически и вне каких-либо отношений, поэтому предложения участников обсуждения разнонаправлены — от уточнения

² Предложения по корректировке законопроекта «О науке и научно-технической деятельности в Российской Федерации» [3].

³ Цели научно-технической политики в РФ [3].

формулировок до постановки новых вопросов, ответы на которые в рамках технологических определений научной деятельности невозможно дать. Логично было бы предмет «научная деятельность» определить через отношения, в которые вступают участники научной деятельности. Основа для этого в проекте имеется, так как указано социальное значение получаемых новых знаний: «...которые способствуют технологическому, экономическому, социальному и духовному развитию общества», но формулировка осталась не раскрытой. Авторы законопроекта поместили определение самого предмета закона в ст. 10, в то время как в предшествующих статьях термин «научная деятельность» уже использован. По существу, закон регулирует не все отношения, которые могут возникать в связи с научной деятельностью, а только те, в которых участвует государство. Но об этом не сказано прямо, поэтому у участников обсуждения возник вопрос: можно ли считать научной деятельностью исследования, проводимые вне рамок научной организации? Именно задача регулирования отношений научных организаций с государством вызывает необходимость классификации видов научной деятельности, приведенной в законопроекте после определения научной деятельности, так как государство применяет разные формы финансирования указанных в классификации видов научной деятельности. Иначе неясна цель этой классификации.

В законопроекте сказано: «Научная и научно-техническая деятельность может осуществляться на договорной основе в соответствии с гражданским законодательством, а также в соответствии с трудовым законодательством в случае осуществления ее научными работниками в рамках исполнения служебных обязанностей». Слово «может» означает, что существуют и другие формы научной деятельности. В связи с этим возникло предложение: «...надо оговорить и то, что научная деятельность может осуществляться и без всяких договоров и служебных обязанностей, — сейчас довольно много независимых исследователей, причем показывающих неплохие результаты, для которых наука — это хобби»⁴. Косвенно эту тему затрагивает предложение: «Установить льготы (коммунальные, налоговые) ученым, работающим в области точных наук: физика, прикладная и теоретическая математика (ученым, имеющим соответствующую репутацию в этой области), которые облегчают создание по их личной инициативе и функционирование под их личным контролем их собственных неформальных лабораторий, библиотек, мастерских, студий, кружков, секций и пр. для проведения и поддержки их собственной научной и образовательной деятельности в России. Порядок реализации льгот ученым, работающим в области точных наук: физика, прикладная и теоретическая математика...»⁵. Определение научной деятельности в схеме регулируемых законом отношений выводит на вопрос о субъектах этих отношений, внутри которого не нашел решения вопрос о различиях между ученым и научным работником, что было отмечено участниками обсуждения.

Субъекты отношений

В законопроекте [2] в ст. 2 «Основные понятия» субъекты научной деятельности указаны в п. 5 перечислением. Субъектами отношений являются как организации, так и отдельные граждане (физические лица). В обсуждениях выражена озабоченность тем, что под понятие «научные организации» не попадают вузы, в связи с чем предлагаются различные виды организаций, которые желательно включить в текст закона.

В предложениях поднимается вопрос о более четком разграничении понятий ученого и научного работника. Замечание Арктического университета⁶: «На основании статей 29, 30 невозможно уяснить разницу между ученым и научным работником. Статья 31 в части

⁴ Об эффективности системы бюджетного финансирования реализуемых разработок, выполняемых вузами на предприятиях и в организациях [3].

⁵ Об эффективности системы бюджетного финансирования реализуемых разработок, выполняемых вузами на предприятиях и в организациях [3].

⁶ Замечания (Северный (Арктический) университет им. М.В. Ломоносова)[3].

перечисления прав научных работников дублирует существующие гражданско-правовые нормы и представляет пример избыточного правового регулирования».

В законопроекте, как и в действующем законе, не указаны различия между этими субъектами в схеме отношений. В действующем законе [1] понятие «ученый» не используется. Понятие «научный работник» детально рассмотрено в законопроекте и в действующем законе как частный случай отношений наемного работника с работодателем. В то же время в действующем законе [1] (п. 6 ст. 4) при перечислении прав научного работника указаны права, не связанные с работой по найму (предпринимательская деятельность, участие в конкурсах, дискуссиях и конференциях). Фактически права ученых шире и включают участие во всевозможных советах при органах власти, возможность участвовать в экспертизе, публиковаться и пользоваться научной информацией. Объем этих возможностей зависит от уровня квалификации ученого, подтвержденного установленными в законе научными степенями. Со ссылками на зарубежный опыт участники обсуждения предлагают не ограничивать научную работу только работой в определенной должности: «Например, в Италии есть должность Senior professor. В данном случае выдающийся профессор, когда он достигает почетного возраста, не читает лекции и не получает зарплату, однако он может продолжать заниматься наукой. Поэтому — почему бы не ввести должность почетного профессора, которая позволяла бы сохранять диссертационные советы, аккумулировать опыт и сохранять преемственность поколений?»⁷. Арктический университет предлагает ввести симметрию в изложение прав научного работника и ученого: «Институт независимых исследователей в научно значимых для всего мира государствах трудится на благо развития науки наравне с остепененными учеными и научными организациями не менее эффективно».

Проблема здесь в том, что общество в России не имеет самостоятельного влияния на политику в области науки, в силу чего интересы общества выражают и реализуют органы власти, что не вполне отвечает их основным функциям. В результате создаются институты участия научной общественности в научной политике, встроенные в систему государственной власти. Такими институтами являются советы по науке при министерстве, совет по науке при президенте, временные советы в рамках реализации целевых государственных программ. Всю эту группу временных организаций можно назвать виртуальными субъектами отношений. Они могут предложить создающим их органам власти свои специальные знания, но не могут рассматриваться как полноценные участники отношений с государством, так как не являются юридическими лицами и не несут ответственности за свои решения. В качестве примера полноценного субъекта отношений, представляющего интересы научного сообщества, можно указать научные общества в Германии, имеющие право отбирать проекты исследований для финансирования. Подобные функции в России до реформирования выполняла Академия наук.

Содержание отношений государства с научными организациями

По поводу отношений научных организаций и вузов с государством предложения участников обсуждения в основном сосредоточены на проблеме самостоятельности организаций, расширении возможностей для того, чтобы вести исследования и передавать полученные знания обществу и государству. Предлагается ликвидировать организационное обременение процедуры закупок. В предложении под названием: «Отменить электронные торги и любые конкурсные процедуры для закупок оборудования, услуг и расходных материалов из средств, полученных при выполнении хоз.-договорной деятельности и оказании услуг бюджетных НИУ негосударственным учреждениям» — дается убедительная аргументация: «Закупки через электронные торги или иные конкурсные процедуры резко увеличивают сроки закупок, повышают цену материалов минимум на 20–30 % и несут коррупционные риски со стороны организаторов закупки. Многие дешевые и уникальные материалы вообще нельзя купить по

⁷ О введении должности почетного профессора [3].

причине их низкой стоимости (приходится приобретать на необходимую сумму ненужные материалы и т. д.). Тенденция к укрупнению научных проектов подразумевает рост потребности рядовых ученых в самостоятельном выживании без государственной поддержки. Поэтому с каждым годом существующая нормативно-правовая база, регламентирующая закупки материалов и приборов, становится все более и более вредной». Действующая система ограничений сомнительна в правовом отношении, так как регламентирует использование средств, принадлежащих юридическому лицу и используемых в уставных целях. Безусловный экономический ущерб заключается не только в повышенных расходах (по оценке авторов предложения, на 20–30 %), но и в критической потере времени, что особенно опасно при выполнении исследований в кооперации с иностранными организациями.

Поставлен и более широкий вопрос о роли субъектов научной деятельности в формировании государственной политики: «Также в законопроекте не определена роль субъектов отношений научной, научно-технической деятельности, субъектов инфраструктуры научной, научно-технической деятельности в формировании и реализации политики в сфере научной, научно-технической деятельности»⁸. В этом кратком замечании содержится принципиально важный вопрос о статусе субъектов научной деятельности: являются ли они частью системы формирования и реализации государственной политики в научной сфере или же только исполнителями, с которыми отношения строятся на условиях подчинения и контрактов? Сам факт участия вузов и научных организаций в обсуждении законопроекта свидетельствует об их способности быть не только субъектами научной деятельности, но и субъектами политики в научной сфере.

Решение поставленных участниками проблем зависит от тех оснований, на которых строятся взаимоотношения научных организаций, включая вузы, и представляющего государство ведомства. Государство предоставляет научным организациям финансирование, в связи с чем возникает вопрос об эквиваленте затраченных средств, который должны представлять научные организации. Каков этот эквивалент?

В материалах обсуждения законопроекта в качестве такого эквивалента на первое место вышел показатель наукометрии в разных формах. Показатель публикационной активности включен в состав показателей результативности научных организаций и вузов [11].

Мнения участников обсуждения о функции наукометрии в качестве измерителя результатов труда ученых даются ниже, здесь же предварительно отметим, что принципиальный вопрос — глубже, он заключен не в форме показателя, а в самом факте подмены общественно полезного результата косвенным показателем. Как сказано в одном из предложений: «Но никакой наукометрии в отчетности науки перед обществом быть не должно. Все наукометрические показатели — исключительно внутреннее дело науки»⁹. Другое предложение составлено как ответы на утверждения: «Сейчас без наукометрии — никуда». Сейчас в мире ни одна крупная корпорация, сколь высокотехнологичной она бы ни была, не отчитывается перед акционерами наукометрией»¹⁰. В то же время значительное число участников дают предложения по совершенствованию системы показателей наукометрии, не ставя под сомнение целесообразность ее применения. Расхождение мнений вызвано, судя по аргументации участников, рассмотрением ими разных функций наукометрии. Вышеприведенная критика является следствием рассмотрения показателей наукометрии в качестве блага, получаемого государством и обществом в обмен на предоставленные научным организациям финансовые средства. Сторонники же наукометрии исходят из возможностей для активно

⁸ Предложения по корректировке законопроекта «О науке и научно-технической деятельности в Российской Федерации» [3].

⁹ Экономическая оценка науки в целом должна основываться исключительно на результатах, имеющих очевидный прикладной эффект [3].

¹⁰ Дискуссия. Наукометрия не может быть формой отчетности перед акционерами [3].

действующих ученых улучшить свое положение при более объективной оценке результатов их деятельности: «Предлагаю создать общегосударственную систему учета результатов труда каждого сотрудника с открытым к ней доступом. Примером такой системы в рамках одного вуза может служить ИСТИНА МГУ [URL: <https://istina.msu.ru> (дата обращения: 05.08.2020)]. То есть в публичном доступе окажется информация о публикационной, педагогической и иной деятельности каждого научного сотрудника. Создание такой системы позволит сделать более прозрачными результаты труда каждого ученого. Также всем интересующимся будет понятно, над какими проблемами работает тот или иной сотрудник, что будет способствовать более легкому налаживанию профессиональных связей»¹¹. То есть речь идет о разных функциях показателей наукометрии. Еще более четко эта позиция выражена в предложении: «Наряду с существующими показателями оценки ПРЕДЛАГАЮ:

1) Ввести как важный и необходимый показатель продуктивности научной деятельности количество ИНДИВИДУАЛЬНЫХ публикаций за период 1–2 лет. То есть выпущенных статей в журналах, индексируемых в WoS и Scopus под именем ОДНОГО автора. Назовем этот индекс-показатель — АИП-авторские индивидуальные публикации»¹².

Позиция государства, выраженная в законопроекте, однозначно основана на внедрении наукометрии в рамках общей политики формализации оценки результатов научной деятельности. В этой ситуации включение в законопроект развернутой формулировки целей поддержки научного комплекса и задач закона не изменит положения, что можно видеть на примере структуры целевых программ, где в начале текста дается содержательная формулировка целей на основе интересов экономики и общества, а в разделе ожидаемых результатов даются показатели наукометрии [9]. Получается, что первая часть текста программы служит обоснованием выделения бюджетных средств, а раздел о результатах обеспечивает отсутствие ответственности за достижение поставленных целей. Позицию отождествления показателей наукометрии с интересами общества подтвердил и министр науки В. Фальков: «Открывая встречу, В. Фальков твердо заявил о необходимости оценки деятельности ученых и исследовательских организаций: раз государство дает ресурсы, оно вправе спрашивать. После апробации на академических институтах выстроенная система будет применяться и для вузов, подчеркнул министр»¹³. Министерство дает ресурсы для выполнения государственных заданий, но акцент делается на обобщенные показатели, имеющие косвенное отношение к заданиям. Высказанная позиция становится более понятной, если учесть, что министерство представляет интересы общества, которое также является участником отношений, регулируемых законом о научной деятельности. При явном введении общества как участника отношений, возникающих в связи с научной деятельностью, разделы законопроекта о наукометрии, об оценке деятельности научных организаций, о контроле качества отчетов и публикаций образуют механизм отношений научного комплекса с обществом, в котором министерство выполняет роль уполномоченной обществом управляющей компании. Согласно законопроекту наукометрия выполняет ряд функций: оценки деятельности научного комплекса в целом, презентации научного комплекса России в мире, оценки деятельности научных организаций, оценки деятельности научных работников. Среди этих функций нет главной — содействия увеличению вклада науки в развитие страны. Предполагается, что достижение этой цели происходит опосредованно по цепочке: органы управления наукой получают информацию о показателях наукометрии и на ее основе принимают управляющие решения, а научные организации под влиянием этих решений увеличивают вклад науки в развитие страны, что каким-то образом отражается в показателях наукометрии. Реально этот

¹¹ Создание единой государственной системы учета результатов труда научного сотрудника [3].

¹² Оценка ИНДИВИДУАЛЬНОЙ научной деятельности — введение АИП [3].

¹³ URL: <http://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=e9099ba7-9f11-49f2-82bb-150bf9d3550b#content> (дата обращения: 05.08.2020) [3].

механизм может действовать через перераспределение бюджетного финансирования от менее активных, по показателям наукометрии, организаций к более активным, но подтвердить достигаемый при этом положительный для общества эффект невозможно. Эта трудность не является спецификой научной области — ранее использование механизма показателей в качестве меры труда подорвало экономику СССР.

Участники обсуждения законопроекта предлагают другой подход к решению задачи повышения эффективности научной деятельности — создавать условия, благоприятные для научной деятельности и для освоения ее результатов промышленностью. При такой постановке задачи отношения управления научными организациями с помощью показателей заменяются отношениями сотрудничества государства с научными организациями.

Участники обсуждения видят два направления, в которых государство могло бы реально содействовать научной деятельности и эффективному применению ее результатов в экономике и обществе. Первое направление — развитие инфраструктуры, прежде всего информационной. Второе направление — создание организаций-посредников, способных интегрировать результаты научной деятельности в интересах производства.

Для первого направления характерно стремление использовать все известные каналы передачи информации для облегчения контактов между учеными и между учеными и обществом. Среди предложений участников обсуждения законопроекта есть идея выделения в Интернете специфически российского Интернета, приспособленного для обмена информацией и защищенного от рекламы. В законопроекте есть раздел «Инфраструктура», предполагающий принятие государством мер по развитию материальной базы научной деятельности и развитию информационных сетей. В обсуждениях предлагается усилить раздел, обратив внимание именно на потребности научных коллективов. «Взаимосвязанные системы научной и технической информации всех форм собственности в РФ — взаимосвязанные современными высокопроизводительными каналами связи технические и организационные средства всех форм собственности в РФ, используемые для накопления, обработки, систематизации и предоставления информационного сервиса в области научной и технической информации»¹⁴. Там же: «Вводится обязательное предварительное депонирование в Государственной системе научной и технической информации документов (сборников, книг, монографий, статей, докладов, отчетов, открытых рецензий и пр.), содержащих результаты научных исследований и предназначенных для открытого опубликования в РФ».

Общая идея предложений этой группы заключается в том, чтобы результаты научной деятельности могли бы в максимальной степени использоваться и оцениваться научным сообществом. Поэтому выдвигаются кардинальные предложения о предоставлении на суд общества всех публикаций независимо от издания. Предложение размещать в одной информационной базе все виды информации о результатах научной и научно-технической деятельности выглядит неконструктивным, но направление развития информационной обеспеченности логично. «Эффективная деятельность научного сотрудника немыслима без доступа к современной информации. Однако никаких гарантий возможностей такого доступа никто, в том числе и обсуждаемый закон, не дает»¹⁵. В этом предложении автор особо подчеркивает значение доступа к мировым научным источникам: «Крайне низкая цитируемость российских работ в мировой науке в значительной степени является отражением не научной слабости отечественных работ или злокозненности зарубежных исследователей, а отсутствия свободного доступа к статьям (особенно переводным) на сайтах российских научных журналов». Второе предложение по этой теме: «Требуется создание отечественной международной базы данных научных публикаций. Данные такой базы должны храниться в Российской Федерации,

¹⁴ Конкретизировать понятие научной деятельности [3].

¹⁵ Возможность доступа и распространения информации [3].

оплачиваться должны отечественные сервера для хранения данных этой базы данных»¹⁶. К этим предложениям следует добавить, что практика деятельности одной из главных баз научной литературы в России — eLibrary.ru [URL: <https://elibrary.ru/defaultx.asp?> (дата обращения: 05.08.2020)] — противоположна этим идеям, если учесть неоднократные «чистки» изданий, проводимые под флагом избавления от «мусорных» журналов. Волна протестов была оставлена без ответа.

Обращается внимание на необходимость всемерного развития научных изданий журналов и книг. «Необходимо отразить в законе право научных организаций учреждать и издавать научные журналы, а также издавать книги. Журналы являются одним из важнейших средств влияния на научные приоритеты и пропаганды наших достижений»¹⁷.

«Научное книгоиздание выполняет важнейшую социально-экономическую функцию — преобразует в товарный вид новейшие знания, добытые учеными, т.е. «упаковывает» эти знания так, чтобы они становились пригодными к широкому усвоению обществом»¹⁸. И далее автор проводит аналогию с государственной поддержкой инновационной деятельности: «Но почему те же принципы поддержки не распространяются на сферу научного книгоиздания?». Издание научной книги, по мнению автора предложения, «эквивалентно этапу опытно-конструкторской разработки, и его предложение обществу в форме пригодного к «эксплуатации» товарного продукта, в данном случае — книги, т.е. предложение рынку высокоинтеллектуального промышленного продукта, поддерживающего — ни много, ни мало — существование других отраслей российской экономики».

Предложения о развитии информационных систем в целях поддержки научной деятельности и взаимодействия научных организаций с потенциальными потребителями в совокупности представляют часть концепции управления научным комплексом, альтернативной системе управления на основе косвенных показателей. Научное сообщество высказывает сомнения относительно эффективности управления научными организациями с помощью показателей, в том числе показателей наукометрии. Академик В. Козлов [12] полагает, что управление научными исследованиями не свойственно министерству науки и высшей школы, во всяком случае в отношении академических институтов: «Министерство со своими задачами общего плана, выработкой политики в области науки и образования — это все-таки нечто другое, чем конкретное руководство работой академического сектора науки». Один из участников обсуждения законопроекта¹⁹ полагает, что необходимо провести мониторинг того, как увязаны наука, образование и экономика в разных регионах; определить, как увязать прорывные научные направления с образованием и экономикой, и заключает: «Наилучшим координатором может выступить Академия наук, которая обладает необходимыми компетенциями в сфере современной российской науки».

Регулирование отношений с научными работниками

В действующем законе о науке и в рассматриваемом законопроекте участники научной деятельности рассматриваются только в качестве научных работников, т.е. работающих в научных организациях по найму.

Научные работники, как было показано ранее, вступают в отношения с государством и работодателями в качестве профессионалов (ученые) и в качестве наемных работников (научные работники). Участники обсуждения законопроекта видят это различие и полагают целесообразным отобразить его в законе.

¹⁶ О создании отечественной международной базы данных научных публикаций [3].

¹⁷ Научным организациям необходимо законодательно закрепленное право издавать научные журналы и книги [3].

¹⁸ Научное книгоиздание — один из ключевых, системообразующих, механизмов интеграции науки, образования и экономики [3].

¹⁹ Главным интегратором науки, образования и экономики должна стать Академия наук [3].

Замечание по этому поводу Северного (Арктического) университета уже было приведено. Далее университет предлагает: «Предлагаю в рамках будущего закона о научной деятельности сформулировать положения о месте и правах независимого исследователя в российской науке, позволяющие трудиться над получением новых знаний в научной среде беспрепятственно». Рассмотрим специфику отношений, в которые работники научной сферы вступают в качестве ученых, т. е. безотносительно условий работы в организации.

По определению ученые не рассматриваются как работающие по найму, и по этой причине в отношении ученых не должны применяться отношения административного типа, но только равноправные договорные отношения. Существо их в том, что государство, принимая во внимание ценность деятельности ученых для общества, предоставляет им привилегии для занятий научной деятельностью. В законе приводятся требования научной квалификации и продуктивности, которым должна удовлетворять деятельность ученого (доказательства квалификации и продуктивности), вводится шкала ученых степеней и званий, на основе которой дифференцируется оплата труда ученых. Кроме того, закрепляются меры поддержки профессиональной подготовки кадров ученых.

Наличие обязательств со стороны государства является основанием для контроля выполнения учеными подразумеваемых с их стороны обязательств. Существо отношений не подвергается сомнениям участниками обсуждения, высказываются лишь соображения о необходимости согласовывать практику реализации этих отношений с общими положениями о гражданских правах.

Об этой стороне отношений применительно к деятельности по проверке работ ученых на плагиат говорит предложение: «Ни в коем случае не использовать этот интересный ресурс «Диссернет» для лишения ученых степеней. Существование текстуального плагиата не является критическим в оценке собственно исследований и разработок. У ВАК есть процедура черного оппонента, которая позволяет проверить качество именно работы, а не словечек в рукописи. Защита же интеллектуальной собственности предусмотрена законодательством. Лишение ученых степеней уже начинает принимать механический характер. Это недопустимо»²⁰. Наказание следует без судебной процедуры, без возможности доказать ценность работы. Уместно напомнить, что рекомендации по написанию рецензий и отзывов на научные работы делают упор на необходимость обнаружения и выделения новых результатов, представляющих интерес для научного сообщества и для страны. Дальнейшее развитие интеллектуальных программ по анализу и обработке научных текстов желательно направлять на решение этой конструктивной и более сложной задачи.

Критика использования показателей наукометрии в качестве инструмента управления деятельностью ученых содержит указания на ущерб, наносимый как науке, так и стране применением этого инструмента. «Оценка научной деятельности ученых, основанная на привнесенном из-за рубежа индексе Хирша, и оценка уровня научной публикации по импакт-фактору научного журнала уже привели к застою и деградации российской науки по существу достигнутых результатов. В новом законе необходимо предусмотреть обязательность публикаций основных результатов диссертаций в отечественных научных журналах, а также при формулировании конкурсных требований ввести обязательную долю отечественных публикаций»²¹.

В законопроекте сделан упор на систему формализованного контроля и оценки, что не отвечает концепции сотрудничества, при этом научное сообщество предстает нуждающимся в постоянном надзоре со стороны государства. Альтернативный подход состоит в восстановлении института научной репутации, что может быть достигнуто при организации доступа ко всем результатам деятельности и организации научного рецензирования, не в смысле

²⁰ «Диссернет» — охота на ведьм! [3]

²¹ Индексы Хирша и импакт-факторы — инструменты врагов отечественной науки [3].

допуска к публикации, а в смысле выявления всего нового и ценного в публикации. Эта мысль в предложениях встречается неоднократно²². Модульная конструкция публикаций, принятая в зарубежных научных изданиях и внедряемая как стандарт в России, при серьезном к ней отношении открывает путь к автоматизации обработки публикаций, облегчению выявления модулей, содержащих новые идеи и результаты. Программы антиплагиата слишком примитивны для решения задачи поиска нового и ценного в публикациях и научных отчетах. Искусственный интеллект, технологии обработки больших данных могут давать ожидаемый результат только при встречном движении со стороны людей, создающих материалы для информационной обработки. Борьба с плагиатом должна быть сбалансирована и дополнена поиском ценной информации в публикациях ученых и доведении ее до максимально широкого круга читателей. Ранее эту функцию выполняли реферативные журналы, в настоящее время необходимо применение современных информационных технологий. Выявление плагиата и недостатков – это дело редколлегий, рецензирования. Судить не по наличию цитат, а по наличию идей. Первый подход создает основания для репрессий – и только, второй подход позволяет реализовать саму идею получения пользы от науки. Предложение создать общедоступную и хорошо организованную информационную систему поддерживается учеными. Эта идея выражается в предложении: «Создание такой системы позволит сделать более прозрачными результаты труда каждого ученого. Также всем интересующимся будет понятно, над какими проблемами работает тот или иной сотрудник, что будет способствовать более легкому налаживанию профессиональных связей»²³.

Следует отметить, что Минобрнауки России ведет конкретную работу по формированию затребованной сообществом ученых информационной системы. «Как сообщил директор Департамента государственной научной и научно-технической политики Минобрнауки Михаил Романовский, ведомство как раз сейчас пытается связать исследователей из разных областей науки. Для этого планируется улучшить работу баз данных ФСМНО (Федеральная система мониторинга и оценки научных организаций) и НИОКР, а также «попробовать связать их с базами Минпромторга и Минобороны» [4].

Мотивировка сторонников расширения применения наукометрии – несколько иная. «Введение такого показателя призвано отсеять от излишнего и неоправданного финансирования (или уменьшить его) многих авторов, вносящих минимальный вклад или просто приписанных к статьям. Что более важно – индексация по АИП позволит выделить и поддерживать реально работающих ученых. А оценку работ пусть производят рецензенты журналов, как это было всегда»²⁴.

«Существует система, которая не позволяет академическим учреждениям избавляться от ученых, которые либо вообще не занимаются научной деятельностью, либо занимаются ее имитацией. Но у них хорошие связи, они удобны по каким-то причинам для руководителей учреждений. Поэтому предлагаю проводить регулярный мониторинг деятельности не только научных организаций, но и отдельных ученых, скажем, один раз в три года»²⁵.

Предлагается дальнейшее развитие системы мониторинга публикационной активности ученых: «В оценке результатов научной деятельности конкретного ученого, наряду с традиционным списком литературы и индексом Хирша в eLibrary, будет полезно учитывать данные одной или нескольких библиографических международных сетей, например ResearchGate, Mendeley и др. За считанные минуты можно получить данные о степени интереса профессионального научного сообщества к публикациям и проектам данного ученого (количественно –

²² Конкретизировать понятие «научная деятельность» [3].

²³ Создание единой государственной системы учета результатов труда научного сотрудника [3].

²⁴ Оценка ИНДИВИДУАЛЬНОЙ научной деятельности – введение АИП [3].

²⁵ Регулярный мониторинг деятельности научных работников [3].

по годам, месяцам, неделям...), числе просмотров в конкретных зарубежных институтах разных стран, цитирования в открытых источниках, комментарии, рекомендации, приглашения к сотрудничеству...»²⁶.

Расхождение позиций не выглядит конфликтным, если принять во внимание то, что это позиции по разным вопросам или по разным типам отношений, в которых находятся ученые. Критика наукометрии обусловлена рассмотрением ее влияния на положение науки в обществе в целом, вследствие чего это вопрос отношений между ученым и обществом. Участники обсуждения в данном случае выступают с гражданских позиций. Вторая группа предложений в пользу наукометрии обусловлена заинтересованностью ученых в адекватной оценке их личного труда как научных работников, и как следствие – переоценка в низшую сторону работников, малоэффективных по критериям наукометрии.

Уже имеются исследования, показывающие, что надежды на оздоровительное влияние наукометрии не оправдываются. Источник, близкий к «Диссернету», провел анализ влияния антиплагиата на количество сомнительных диссертаций и на количество публикаций в журналах, входящих в систему Scopus²⁷. Отмечено, что число диссертаций после массовых проверок стало уменьшаться, но зато резко возросло число публикаций в так называемых хищных журналах, входящих в систему учета Scopus, но действующих на коммерческих началах и печатающих публикации низкого качества. Динамика показана на рисунке.



Рост публикаций российских ученых в англоязычных зарубежных журналах-«хищниках»

Сложившаяся ситуация является следствием смешения функций наукометрии и научных публикаций. Данные наукометрии в основном играют роль статистических данных, которые нельзя рассматривать как полезную продукцию, но можно использовать в качестве условной оценки деятельности отрасли, отдельных организаций и научных работников. В этом отношении данные наукометрии удобны своей универсальностью и простотой, а отрицательные последствия их широкого использования вызваны недопустимой заменой анализа действительной продукции научной деятельности анализом косвенных показателей.

²⁶ Как еще объективно оценить научную деятельность ученого [3].

²⁷ URL: <https://zen.yandex.ru/media/dissernet/rost-publikacii-rossiiskih-uchenyh-v-angloia-zychnyh-zarubejnyh-jurnalahhiscnikah-5e5506e607d15006cd230201> (дата обращения: 05.08.2020) [3].

Отношения научных работников с работодателем как отношения внутри организации с активным внедрением наукометрии все более приобретают характер перехода от повременной оплаты труда к сдельной оплате.

Этот переход фиксируется новой формой трудового договора: «эффективный контракт» [7]. Оплата труда состоит из трех частей: должностной оклад, компенсационные выплаты, стимулирующие выплаты²⁸. Должностной оклад в совокупности с компенсационными выплатами является частью системы повременной оплаты труда, а стимулирующие выплаты уже являются элементом сдельной оплаты труда. На практике четкое разделение еще не сложилось. В рассмотренном в качестве примера положении об эффективном контракте Института океанологии им. П.П. Ширшова третья часть оплаты труда формируется из фондов стимулирования подразделений. Величина фонда определена заранее и распределяется пропорционально баллам, полученным каждым научным работником. Показатели наукометрии в системе критериев результативности играют ведущую роль. Величина стимулирующей надбавки является частью фонда подразделения, который, в свою очередь, является частью фонда института, происхождение которого в документах не определено. Таким образом, система эффективного контракта работает как схема распределения между сотрудниками общего фонда института, но не как дополнительный заработок, хотя внешне выглядит как оплата труда по производству услуг и продуктов, заложенных в критерии результативности. В этом обстоятельстве заключено противоречие, перечисленные в таблице критериев: виды деятельности являются обычными видами деятельности научного работника (подготовка научного отчета, публикация, участие в конференциях и совещаниях, подготовка рецензий и отзывов), кроме включенного в эту схему реального коммерческого продукта — выполнения работ, приносящих внебюджетные доходы. Если работник приносит доходы, то он должен получать не баллы, а часть этих доходов. Все остальные виды работ не являются хозяйственной деятельностью, приносящей доход, и они не создают источника для формирования фондов стимулирования. На начальном этапе применения подобная схема может дать положительный результат, но далее она должна будет получить правовую и экономическую основу, чтобы избежать компрометации применяемых методов оценки результатов труда научных работников [5, 10]. Аналогичный процесс происходил в промышленности СССР в 80-е гг. XX в. в ходе развития хозрасчета, когда центральным элементом отношений коллектива с государством (работодателем) становился фонд оплаты труда предприятия. Но фонд не был защищен законодательно, а отсутствие рынка не позволяло получить за созданную продукцию адекватную плату.

Эти базовые вопросы не нашли отражения в законопроекте о научной деятельности. Трудности в этом направлении объективны, с подобными проблемами сталкиваются все страны, имеющие научные комплексы [8]. В Европейском союзе [13] принимают компромиссное решение о способах получения оценки научного продукта в отсутствие реального рынка: «После завершения научного проекта проводятся анализ и оценка непосредственных результатов (outputs) и определение показателя эффективности, выраженного в форме соотношения затрат и непосредственных результатов». Но сделать это не всегда удается, поэтому применяют промежуточные показатели: «К таким показателям относят, в частности, число публикаций в реферируемых журналах по теме НИОКР, количество цитирований, объем средств на реализацию проекта в расчете на одну публикацию в Топ-10 отраслевых изданий и др.».

Заключение

По мнению автора, метод создания закона путем учета высказываемых пожеланий и замечаний имеет ограниченную ценность, так как может помочь только в редактировании документа, устранении очевидных ошибок, но не может быть опорой для создания документа, опирающегося на экономические реалии и на право. В случае конфликта интересов субъектов отношений в научной деятельности необходим анализ экономического содержания

²⁸ Описание дается на примере пакета документов Института океанологии РАН [6].

отношений, правовой стороны вопроса и сопоставления с более высокими по рангу ценностями. Поэтому следует признать правоту тех участников обсуждения законопроекта, которые настаивали на необходимости включения в законопроект преамбулы, показывающей связь целей закона с интересами государства и общества, выраженными в других документах.

Обработка массива предложений приводит к выводу, что построение закона на базе концепции отношений по властной вертикали оценивается научным сообществом как морально устаревшее. Назрела необходимость переходить к равноправному взаимодействию органов власти с научным сообществом, что даст новое дыхание государственной политике в области научной и инновационной деятельности. Эта тенденция все шире проявляется в странах Европы, и она открывает путь к повышению эффективности и престижа научной деятельности. Речь идет о переходе от управления научной сферой с помощью косвенных показателей и административных оценок к организации сотрудничества, нацеленного непосредственно на достижение общественно значимых результатов.

С точки зрения научной методологии анализ показал ценность информации, собираемой при организации общественного обсуждения важных проблем. Собранные по инициативе Минобрнауки России и представленные общественности на специализированном сайте мнения научных работников представляют ценность в исследовании проблем государственной политики в научной сфере.

По нашему мнению, традиционный подход к формированию законопроекта на базе жестких определений терминов и понятий не может быть эффективным, так как содержание этих понятий изменчиво, а отсутствие экономического наполнения не дает установить границы, необходимые для введения понятий. Более рационально — как можно точнее изложить суть концепции государственной политики, понимание государством места научной деятельности в жизни общества и государства.

Публикация подготовлена по результатам исследований в Российском научно-исследовательском институте экономики, политики и права в научно-технической сфере (РИЭПП).

Список литературы

1. Федеральный закон от 23.08.1996 № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» (последняя редакция). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_11507 (дата обращения: 05.08.2020).
2. Проект федерального закона «О научной и научно-технической деятельности в Российской Федерации». URL: https://www.sbras.ru/files/news/docs/novyj_zakonoproekt_o_nauchnoy_deyatelnosti.pdf (дата обращения: 05.08.2020).
3. Общественные консультации по законопроекту о научной и научно-технической деятельности. URL: <https://www.preobra.ru/nauka> (дата обращения: 05.08.2020).
4. Прикладная наука: от «информационного стриптиза» к передовому инжинирингу. URL: <https://profiok.com/news/detail.php?ID=8622> (дата обращения: 05.08.2020).
5. Морозов С. Сдельная оплата труда: обратный эффект. URL: <https://www.cfin.ru/management/people/deal.shtml> (дата обращения: 05.08.2020).
6. Институт океанологии РАН им. П.П. Ширшова. Положение об эффективном контракте. URL: <https://ocean.ru/index.php/novosti-left/novosti-instituta/item/1064-perevod-nauchnykh-sotrudnikov-instituta-na-effektivnyj-kontrakt> (дата обращения: 05.08.2020).
7. Ломская Т., Базанова Е. Переход бюджетников на эффективный контракт не улучшил качество их работы. Зато нагрузка на них резко выросла // Ведомости. 10.07.2017 // Экономика. URL: <https://www.vedo-mosti.ru/economics/articles/2017/07/11/718583-byudzhnikov-kontrakt> (дата обращения: 05.08.2020).
8. Гайгер Роджер Л. Знания и деньги. Исследовательские университеты и парадокс рынка / пер. с англ. И. Дягилевой; под науч. ред. А. Рябова / Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: Изд. дом ВШЭ, 2018. 408 с. (Б-ка журнала «Вопросы образования»).

9. Андреев Ю.Н. Анализ идеологии научно-технической политики // Экономика, социология и право. 2016. № 11. С. 7–15. URL: <http://elibrary.ru/download/51321999.pdf> (дата обращения: 05.08.2020).

10. Крайнов Г.Н. К вопросу об экономическом эффекте эффективного контракта в образовании // Фундаментальные исследования. 2017. № 5. С. 163–166. URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41527> (дата обращения: 05.08.2020).

11. Приказ Министерства науки и высшего образования РФ от 30.07.2019 № 544 «Об утверждении Методики оценки результативности деятельности научных организаций, подведомственных Министерству науки и высшего образования Российской Федерации, выполняющих научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы гражданского назначения». URL: <https://base.garant.ru/72765560> (дата обращения: 05.08.2020).

12. Довести реформу до логического конца. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4292026> (дата обращения: 05.08.2020).

13. Богачева О.В., Смородинов О.В. Актуальные вопросы организации государственного финансирования НИОКР в странах ОЭСР / Науч.-исслед. фин. ин-т // Финансовый журнал. 2019. № 2. С. 37–50.

References

1. *Federal'nyy zakon ot 23.08.1996 No. 127-FZ «O nauke i gosudarstvennoy nauchno-tekhnicheskoy politike» (poslednyaya redaktsiya)* [Federal Law of 23.08.1996 No. 127-FZ «On Science and State Scientific and Technological Policy» (latest edition)]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_11507 (date of access: 05.08.2020).

2. *Proekt federal'nogo zakona «O nauchnoy i nauchno-tekhnicheskoy deyatel'nosti v Rossiyskoy Federatsii»* [Draft federal law «On scientific and scientific&technological activities in the Russian Federation»]. Available at: https://www.sbras.ru/files/news/docs/novyy_zakonoproekt_o_nauchnoy_deyatelnosti.pdf (date of access: 05.08.2020).

3. *Obshchestvennye konsul'tatsii po zakonoproektu o nauchnoy i nauchno-tekhnicheskoy deyatel'nosti* [Public consultations on the draft law on scientific and scientific&technological activities]. Available at: <https://www.preobra.ru/nauka> (date of access: 05.08.2020).

4. *Prikladnaya nauka: ot «informatsionnogo striptiza» k peredovomu inzhiniringu* [Applied Science: from «information striptease» to advanced engineering]. Available at: <https://profiok.com/news/detail.php?ID=8622> (date of access: 05.08.2020).

5. Morozov S. *Sdel'naya oplata truda: obratnyy effekt* [Piecework wages: the opposite effect]. Available at: <https://www.cfin.ru/management/people/deal.shtml> (date of access: 05.08.2020).

6. Institute of Oceanology RAS P.P. Shirshov. *Polozhenie ob effektivnom kontrakte* [Effective contract clause]. Available at: <https://ocean.ru/index.php/novosti-left/novosti-instituta/item/1064-perevod-nauchnykh-sotrudnikov-instituta-na-effektivnyj-kontrakt> (date of access: 05.08.2020).

7. Lomskaya T., Bazanova E. (2017) *Perekhod byudzhетников na effektivnyy kontrakt ne uluchshil kachestvo ikh raboty. Zato nagruzka na nikh rezko vyrosla* [The transition of state employees to an effective contract did not improve the quality of their work. But the load on them has grown sharply] *Vedomosti. 10.07.2017. Ekonomika*. [Vedomosti. 10.07.2017. Economics]. Available at: <https://www.vedomosti.ru/economics/articles/2017/07/11/718583-byudzhетnikov-kontrakt> (date of access: 05.08.2020).

8. Geiger Roger L. (2018) *Znaniya i den'gi. Issledovatel'skie universitety i paradoks rynka. Per. s angl. I. Dyagilevoy; pod nauch. red. A. Ryabova* [Knowledge and money. Research universities and the market paradox. Under scientific. ed. A. Ryabova] *Nats. issled. un-t «Vysshaya shkola ekonomiki». Izd. dom VshE. B-ka zhurnala «Voprosy obrazovaniya»* [Nat. issled. University Higher School of Economics. Ed. House of Higher School of Economics. Library of the journal «Education Issues». Moscow. 408 p.

9. Andreev Yu.N. (2016) *Analiz ideologii nauchno-tekhnicheskoy politiki* [Analysis of the ideology of scientific and technological policy] *Ekonomika, sotsiologiya i pravo* [Economics, Sociology and Law]. No. 11. P. 7–15. Available at: <http://elibrary.ru/download/51321999.pdf> (date of access: 05.08.2020).

10. Krainov G.N. (2017) *K voprosu ob ekonomicheskom effekte effektivnogo kontrakta v obrazovanii* [On the question of the economic effect of an effective contract in education] *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental

research]. No. 5. P. 163–166. Available at: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41527> (date of access: 05.08.2020).

11. *Prikaz Ministerstva nauki i vysshego obrazovaniya RF ot 30.07.2019 No. 544 «Ob utverzhdenii Metodiki otsenki rezul'tativnosti deyatel'nosti nauchnykh organizatsiy, podvedomstvennykh Ministerstvu nauki i vysshego obrazovaniya Rossiyskoy Federatsii, vypolnyayushchikh nauchno-issledovatel'skie, opytно-konstruktorskie i tekhnо-logicheskie raboty grazhdanskogo naznacheniya»* [Order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation of July 30, 2019 No. 544 «On approval of the Methodology for assessing the performance of scientific organizations subordinate to the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation that carry out research, development and technological work for civilian purposes»]. Available at: <https://base.garant.ru/72765560> (date of access: 05.08.2020).

12. *Dovesti reformu do logicheskogo kontsa* [Bring the reform to its logical conclusion]. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/4292026> (date of access: 05.08.2020).

13. Bogacheva O.V., Smorodinov O.V. (2019) *Aktual'nye voprosy organizatsii gosudarstvennogo finansirovaniya NIOKR v stranakh OESR* [Topical issues of the organization of public funding for R&D in OECD countries] *Nauch.-issled. fin. in-t. Finansovyy zhurnal* [Scientific research. fin. in-t. Financial journal]. No. 2. P. 37–50.

DOI 10.35264/1996-2274-2020-2-96-107

СЦЕНАРИИ ТРАНСФОРМАЦИИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЭЛИТ В ПОЗДНЕСОВЕТСКИЙ И ПОСТСОВЕТСКИЙ ПЕРИОДЫ: РЕЗУЛЬТАТЫ СИСТЕМНО-ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Д.С. Жуков, доц. Тамбовского государственного университета им. Г.Р. Державина, канд. ист. наук, доц., ineternatum@mail.ru

Д.Г. Сельцер, проф. Тамбовского государственного университета им. Г.Р. Державина, д-р полит. наук, проф., seltser@yandex.ru

Н.С. Барабаш, нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. филол. наук, nsb@extech.ru

Рецензент: Н.Е. Зудов

В статье представлены реалистичный и альтернативный (контрфактический) сценарии развития региональных административно-политических элит в России в 1985–2004 гг. Сценарии построены посредством системно-динамической модели, имитирующей рекрутирование элит в программной среде Powersim Studio. Модель описывает механизмы и каналы пополнения управленческих кадров, а также социополитические силы, которые влияли на элитозамещение. Эксперименты с моделью позволяют исследовать разные варианты эволюции элит. Контрфактический сценарий исходит из гипотетического отказа М.С. Горбачева от демонтажа номенклатурной системы и от ликвидации контроля КПСС над «расстановкой кадров». Модель демонстрирует, что в этом случае не произошло скоротечной деградации региональных элит (как это было в реалистичном сценарии). Однако к началу 2000-х гг. возникли иные системные проблемы, связанные с разрывом между принципами формирования управленческого аппарата и трансформирующимися социально-экономическими реалиями.

Ключевые слова: системно-динамическое моделирование, административно-политические элиты, регионы России, политология, позднесоветский период, постсоветский период.

SCENARIOS OF TRANSFORMATION OF REGIONAL ELITES IN THE LATE SOVIET AND POST-SOVIET PERIODS: RESULTS OF SYSTEM-DYNAMIC MODELING

D.S. Zhukov, Associate Professor, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Doctor of Historical Sciences, ineternatum@mail.ru

D.G. Seltser, Professor, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Ph.D., seltser@yandex.ru

N.S. Barabash, Head of Department, SRI FRCEC, Doctor of Philology, nsb@extech.ru

The article presents realistic and alternative (counterfactual) scenarios for the development of regional administrative and political elites in Russia in 1985–2004. The scenarios are built using a system-dynamic model that simulates elite recruitment in the Powersim Studio software environment. The model describes the mechanisms and channels for recruiting managerial personnel, as well as the sociopolitical forces that influenced elite substitution. Experiments with the model allow us to explore different variants of the evolution of elites. The counterfactual scenario proceeds from the hypothetical refusal of M.S. Gorbachev from dismantling the

nomenclature system and from eliminating the CPSU's control over the «placement of personnel». The model demonstrates that in this case, there was no rapid degradation of regional elites (as was the case in the realistic scenario). However, by the beginning of the 2000s, other systemic problems arose due to the gap between the principles of forming the management apparatus and the transforming socio-economic realities.

Keywords: system-dynamic modeling, administrative-political elites, regions of Russia, political science, late Soviet period, post-Soviet period.

Задача, подходы и инструментарий

Задача исследования состояла в построении контрфактического сценария развития региональных административно-политических элит в России в конце 1980-х — начале 2000-х гг. Одной из системных проблем, «взорвавших» СССР и долгое время поддерживавших «инерцию распада» России, было формирование не лояльных союзному (федеральному) центру местных элит, обладавших собственными ресурсами и мотивами, не сопряженными с общенациональными интересами.

Авторы исходят из представления о том, что отправной точкой возвышения таких элит было скоротечное разрушение номенклатурной системы рекрутирования управленческих кадров, произошедшее после ряда решений М.С. Горбачева. Используя системно-динамическую модель рекрутирования элит, авторы поставили вопрос о возможных иных вариантах динамики элит в случае отказа М.С. Горбачева от некоторых политических преобразований. В экспериментах с системно-динамической моделью были изучены гипотетические (альтернативные, контрфактические) возможности кадровой политики в горизонте до 2004 г. Потенциал существующей — реальной — системы может быть исследован в сравнении с нереализованными вариантами.

Модель рекрутирования региональных административно-политических элит России (1985–2019) была презентована авторами в предшествующих публикациях [5]. Теоретико-методологическая база исследования включает идеи и инструментарий системно-динамического моделирования (СДМ) [1, 4, 6, 11, 14], а также наработки элитологии [2, 3, 10, 19, 20]. Эмпирической базой для модели послужили конкретно-предметные исследования по восьми областям и республикам Центральной России и Поволжья [7–9, 12, 13, 15–18]. Модель имитирует в виртуальной среде механизмы, каналы рекрутирования, а также поведение заинтересованных акторов. Это дает возможность проводить вычислительные эксперименты, изменяя те или иные условия модели (например, решения акторов или уровни их влиятельности). Модель в формате Powersim, а также серия альтернативных сценариев доступны онлайн [URL: <http://ineternum.ru/sdml> (дата обращения: 30.09.2020)].

«Система в рамках СДМ представляется в виде диаграммы (схемы) запасов и потоков. Элементы и связи в такой диаграмме отражают качественные политологические представления и, в то же время, наделены определенными математическими смыслами... Разработанная нами модель имитирует ряд хронологически последовательных состояний системы рекрутирования: диаграмма запасов и потоков совмещает несколько исторических периодов — с 1985 до 2019 г.

Интерес представляет динамика численности двух запасов («низшее и среднее звенья элиты» и «высшее звено элиты»), а также количество людей, которые пополняли элиту (каждый из двух запасов) из разных источников (и посредством разных механизмов) в течение каждого периода. Модель позволяет отслеживать (по состоянию на каждое полугодье) интенсивность потоков, которые пополняют элиту и исходят из разных социальных источников (сред/резервуаров)» [5].

На рис. 1 показана диаграмма запасов и потоков. Обозначения элементов диаграммы даны в табл. 1.

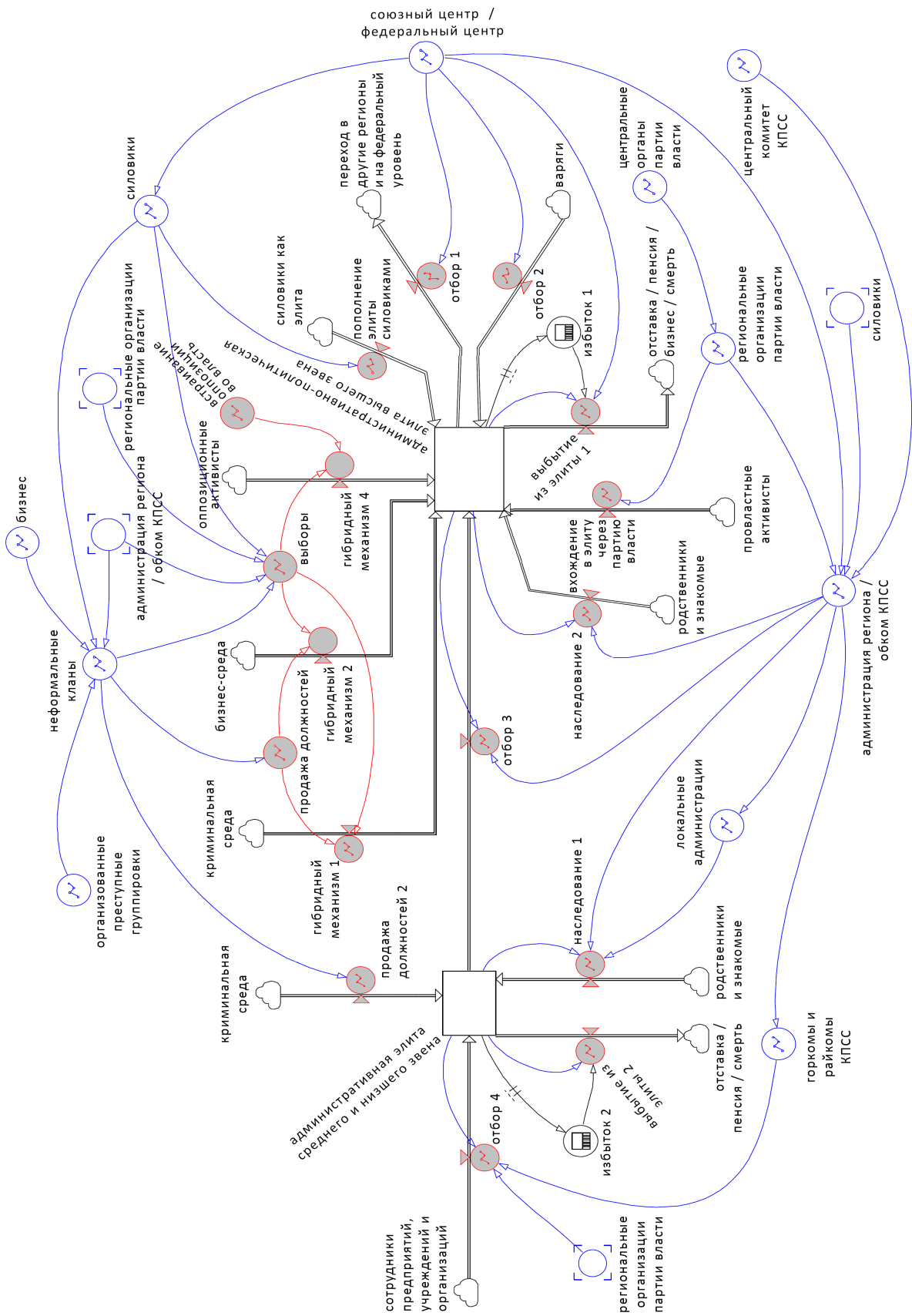










Рис. 1. Диаграмма запасов и потоков

Таблица 1

Обозначения элементов диаграммы запасов и потоков

Графические символы	Смысл элемента в данной модели	Термины, принятые в СДМ
	Звенья — совокупность позиций в элите того или иного уровня	Запасы/уровни/переменные уровней
	Потоки — каналы перемещения людей между звеньями элиты; каналы для поступления новобранцев в элиту из разных социальных сред; каналы сброса численности элиты	Потоки/материальные связи
	Среды/социальные резервуары, из которых пополняется элита	Внешние источники
	Механизмы, посредством которых акторы продвигали своих представителей в состав элиты	Переменные темпа
		Вспомогательные переменные
	Акторы, которые воздействовали на формирование элиты	Вспомогательные переменные
	Влияние — информационные связи между акторами и механизмами	Коннекторы
	Ярлыки	Ярлыки/псевдонимы

Исторический контекст

Радикальное повышение значимости выборных процедур (при формировании руководящих органов КПСС и государства) стало ключевым событием, инициировавшим быстрое разрушение номенклатурной системы, в том числе механизмов рекрутирования региональной административно-политической элиты. Партия не только лишилась контроля над замещением важнейших должностей в регионах (кадровый контроль), но и утратила легитимность как институт, дублирующий государственные функции.

Введение выборов было одним из главных лозунгов генерального секретаря ЦК КПСС. Январский пленум ЦК КПСС 1987 г. по кадровым вопросам дал старт этой тенденции. Фактически одним из логических результатов такой политики стал Указ Президента РСФСР Б.Н. Ельцина от 23.07.1991 «О департизации».

Выборы создавали новые механизмы и каналы проникновения в элиту. Поэтому партия весьма быстро потеряла свое монопольное право на подбор и расстановку кадров. Выборы в партии (1987–1990) и государстве (1989–1990) хаотизировали существовавшую тогда номенклатурную систему. В конечном счете это было одним из факторов распада СССР. Избранные на альтернативной основе советы и, следовательно, председатели исполкомов советов обрели легитимность, позволившую им освободиться от партийного влияния, в том числе и в кадровых вопросах. На предприятиях корпоративная кадровая политика вернулась в руки руководителей-хозяйственников.

Реалистичный сценарий

Прежде чем ответить на вопрос, что было бы, если М.С. Горбачев не ввел выборные процедуры в партии и государстве, рассмотрим реалистичный сценарий. Этот сценарий, который имитирует свершившийся вариант развития событий, был сопоставлен с известными

историческими данными [7–9]. Модель, таким образом, была верифицирована и показала способность корректно описывать эмпирические факты.

Рис. 2 демонстрирует, что динамика элиты в реалистичном сценарии отчетливо распадается на три этапа. В контексте данного исследования интересны прежде всего первые два из них.

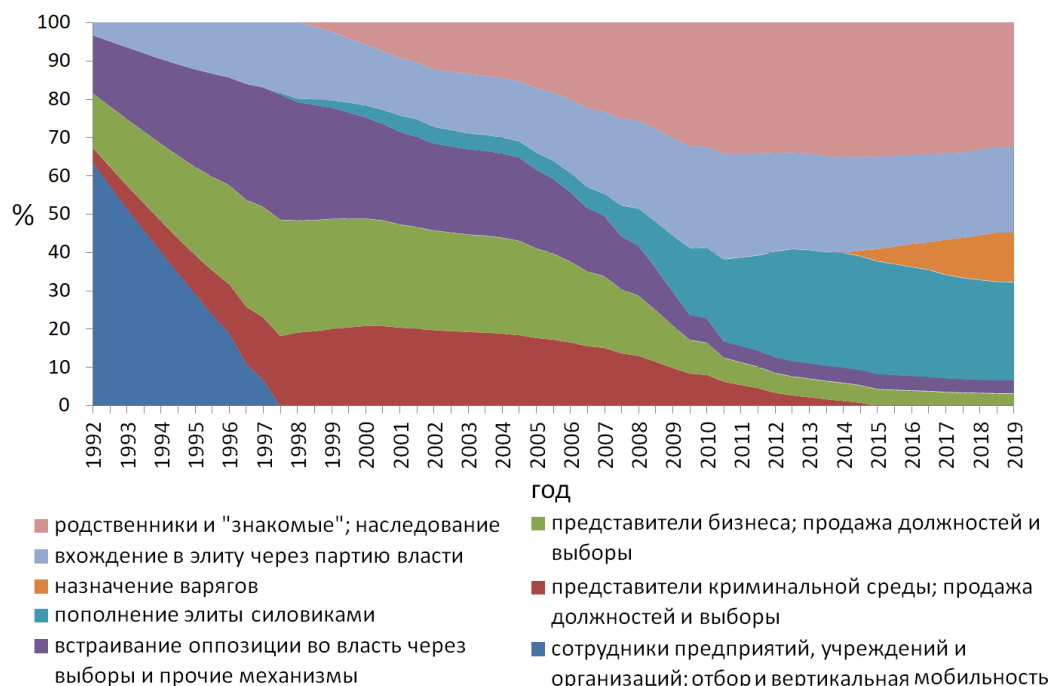


Рис. 2. Состав новобранцев в высшее звено элиты в течение минимального периода полного обновления, реалистичный сценарий

В течение первого этапа (1985–1998) доминирующего положения достигли группы, от которых трудно было ожидать лояльности по отношению к федеральным властям. Это представители бизнеса, криминала и оппозиции. После 1991 г. эти группы быстро вытеснили старые номенклатурные кадры. К концу этого этапа федеральный центр непосредственно столкнулся с проблемой неуправляемости региональных элит и администраций не только в отдельных национальных республиках, но и во множестве иных субъектов федерации.

Низкое качество скоротечно сформировавшихся административно-политических элит вело к масштабному разворачиванию коррупционных практик и к отчуждению населения от властей. Адресатами недовольства народа, как правило, становились не только и не столько регионалы, сколько федеральные властные институты, которые инициировали (в лице Б.Н. Ельцина) деструктивные процессы.

Содержание второго этапа (1998–2009) определяется попытками обновленного федерального центра переломить негативные тенденции, используя наиболее доступные и быстрые инструменты. Политика встраивания вертикали власти, которую проводил новый президент В.В. Путин, предусматривала, среди прочего, препятствование (а затем и полный запрет) проникновению криминала в органы власти, а также ослабление роли выборов как механизма формирования местных элит. Это уменьшило приток в элиту бизнеса, криминала и оппозиции. Заметные результаты (в плане изменения состава элиты) такая политика начала давать к 2004 г. Если до того момента численное доминирование указанных групп

сохранялось (хотя и медленно убывало), то с этого момента их доля в элите начала быстро и неуклонно сокращаться.

Бизнес, криминал и оппозиция в составе элиты уступили место не только выдвиженцам партии власти, варягам и силовикам (их влияние и доля росли до 2010 г. довольно медленно), но, главным образом, представителям группы, которую мы обозначили как «родственники и знакомые». Это «люди, которые получили элитные позиции, поскольку состояли в разного рода личных отношениях с представителями уже существующей элиты. Механизм рекрутирования таких людей мы обозначили как «наследование». Рекрутирование элиты на основании личных связей порождено естественным стремлением элиты как социальной группы к замыканию, к наследованию и воспроизводству в поколениях своего статуса» [5].

Такой побочный эффект чистки элит сформировал системную проблему, которая означала сохранение (конечно, в существенно меньшей мере, нежели в ельцинский период) невысокого качества элит и их низкой — мерцающей — легитимности. «Борьбой государства за оздоровление элиты в полной мере воспользовались не провластные силы, а именно традиционалистские институты, которые очень быстро возродились и отомобилизовались» [5].

Динамика низшего и среднего звеньев элиты представлена на рис. 3. Очевидно, что процессы в течение первого этапа в этих звеньях можно характеризовать как катастрофу, а оздоровление элиты в течение второго этапа слишком затянулось и не принесло ожидаемых результатов.

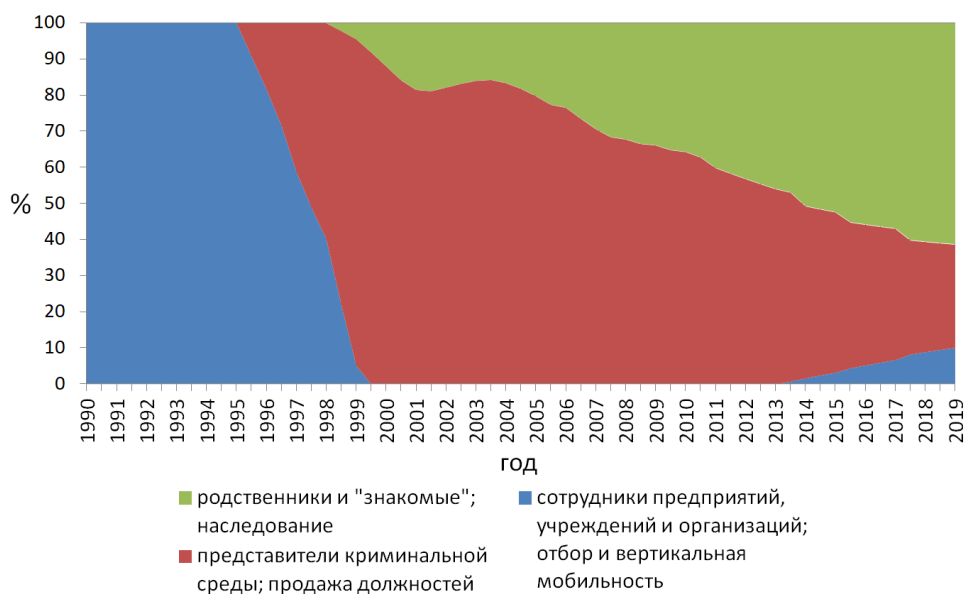


Рис. 3. Состав новобранцев в среднее и низшее звенья элиты в течение минимального периода полного обновления, реалистичный сценарий

Пока существовали номенклатурная система и партийный контроль над расстановкой кадров, райкомы и горкомы КПСС, а также партийные ячейки на предприятиях занимались рекрутированием в состав управленцев активных и талантливых выходцев из разных сфер — из числа так называемых сотрудников предприятий, организаций и учреждений. После департизации не осталось фактически ни одного регионального органа, который был бы заинтересован и имел бы возможность поддерживать такой отбор, т. е. сохранять карьерные лифты. Поэтому управленческий аппарат быстро наполнился представителями криминала,

а затем — «родственниками и знакомыми». «И лишь с 2014 г. был запущен механизм отбора — в среднем звене стали появляться варяги (из числа местных деятелей, перемещенных в другие районы или другие ведомства); а в низшее звено наметился приток активной молодежи при поддержке государственных программ карьерного роста и мобильности. Однако эти механизмы пока не успели насытить элиту активными и талантливыми выходцами из других социальных сред» [5].

Контрфактический сценарий

Отправной точкой альтернативного сценария является отказ Михаила Горбачева от принятия в конце 1980-х — начале 1990-х гг. решений, направленных на слом номенклатурных практик и передачу властных функций (в том числе кадрового контроля) от партийных органов к советским.

Для реализации этого сценария в базовую модель (реалистичный сценарий) были внесены следующие модификации:

1) величины влияния всех акторов на другие акторы и на механизмы рекрутирования сохранились на уровне последнего года существования СССР (за исключением тех случаев, которые специально оговорены в дальнейшем);

2) выборы не стали сколько-либо значимым механизмом рекрутирования;

3) ЦК КПСС, обкомы/рескомы, горкомы и райкомы КПСС сохранялись;

4) новая партия власти не возникла;

5) функции региональной администрации (в кадровой сфере) остались у обкома/рескома КПСС;

6) номенклатурная система сохранялась: обком КПСС снижал поощрение механизмов «наследования» до 0,11 для «наследования 1» и до 0,33 — для «наследования 2». Эта величина втрое меньше, чем та, которая установилась в последний год перед разрушением номенклатуры. Обком КПСС сокращал поддержку локальных администраций (стремящихся к усилению механизма «наследования 1») до 0,32. Эта величина вдвое меньше, чем та, которая установилась в последний год перед разрушением номенклатуры;

7) механизмы отбора (т.е. вертикальной карьерной мобильности в управленческом аппарате, а также каналы пополнения элиты из внеэлитных сред) не замораживались.

Контрфактический сценарий построен до 2004 г. Именно в этом году в реалистичном сценарии дали видимые результаты усилия В.В. Путина по выстраиванию вертикали власти и трансформации системы рекрутирования. Соответственно, были финализированы тенденции, начавшиеся в конце 1980-х гг.

Условия эксперимента содержат три принципиальных, хотя и недостаточно явных, условия.

1. Изменились лишь политико-кадровые решения Горбачева. Но такие решения не останавливали характерное для реалистичного сценария социально-экономическое развитие страны (включая капиталистическую трансформацию и, например, появление бизнеса и криминала как влиятельных акторов и пр.).

2. Институты КПСС и номенклатурные практики в альтернативном сценарии хотя и продолжили существование, но значительно ослабли: модель пролонгирует их состояние 1990—1991 гг. Не имеет смысла моделировать условия «позднего Брежнева».

3. С конца 1980-х гг. до 2004 г. не принимались какие-либо принципиальные решения относительно изменения системы рекрутирования элит. Альтернативный сценарий целиком исходит из решений последнего Генерального секретаря ЦК Компартии Советского Союза о сохранении КПСС и номенклатуры. И в этом смысле такой альтернативный сценарий является инерционным.

Результаты моделирования представлены на рис. 4—7.

В нижнем и среднем звеньях элиты (см. рис. 4) ослабление номенклатурных практик и давление патологических проявлений капиталистической трансформации привели к обвалу в конце 1990-х гг. доли карьерных номенклатурщиков и к замещению их выходцами из

криминальной среды и, в меньшей мере, «родственниками и знакомыми». Хотя процесс этот развивался существенно более медленно, нежели в реалистичном сценарии, тем не менее в альтернативной реальности состояние нижнего и среднего звеньев также оказалось в конце концов катастрофическим.

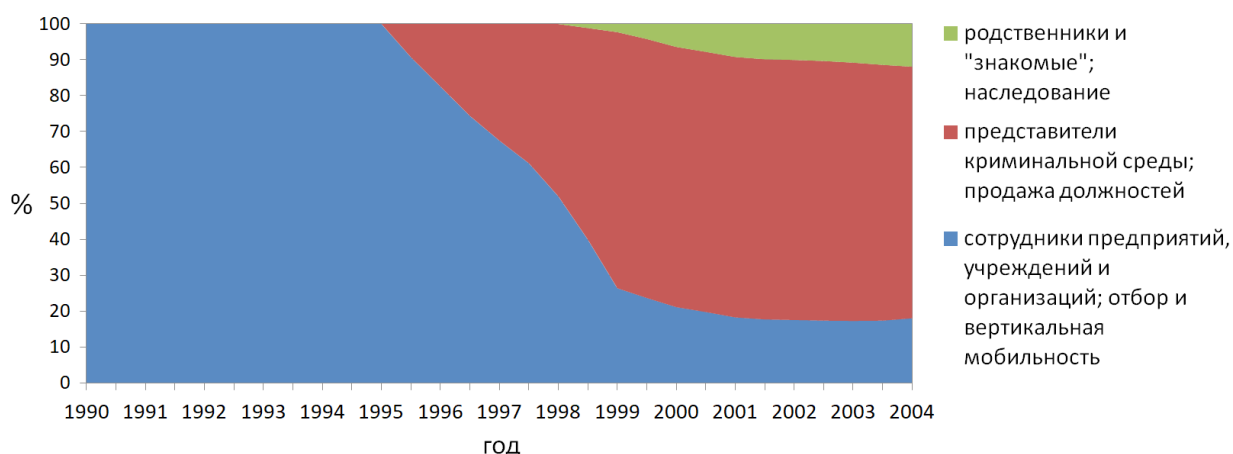


Рис. 4. Состав новобранцев в низшее и среднее звенья элиты в течение минимального периода полного обновления, альтернативный сценарий

К этому следует добавить, что общая численность этих звеньев сильно колеблется (рис. 5) вследствие того, что слишком много новобранцев проникает в состав элиты и система нуждается в регулярном сбросе излишков. Поскольку этот механизм действует с задержкой, возникают колебания, которые, очевидно, ведут к депрофессионализации административного аппарата и к разрушению преемственности управленческих практик.

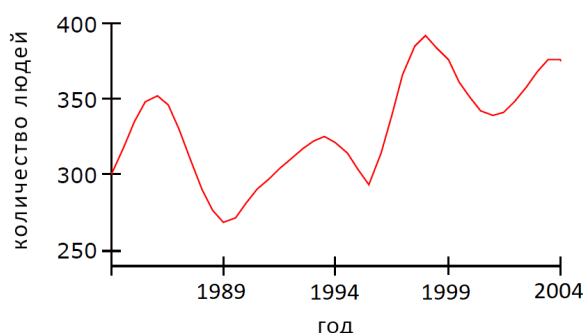


Рис. 5. Динамика общей численности среднего и низшего звеньев административной элиты, альтернативный сценарий

Альтернативная ситуация в высшем звене элиты внешне представляется довольно стабильной (см. рис. 6). Доля нелояльных групп росла, но медленно. Карьерные номенклатурщики (от которых существующая власть, безусловно, могла ожидать лояльности) медленно сдавали позиции, но к 2004 г. сохраняли весомые 47 % мест. Следует также учитывать, что более 11 % мест были заняты к 2004 г. и лояльными силовиками.

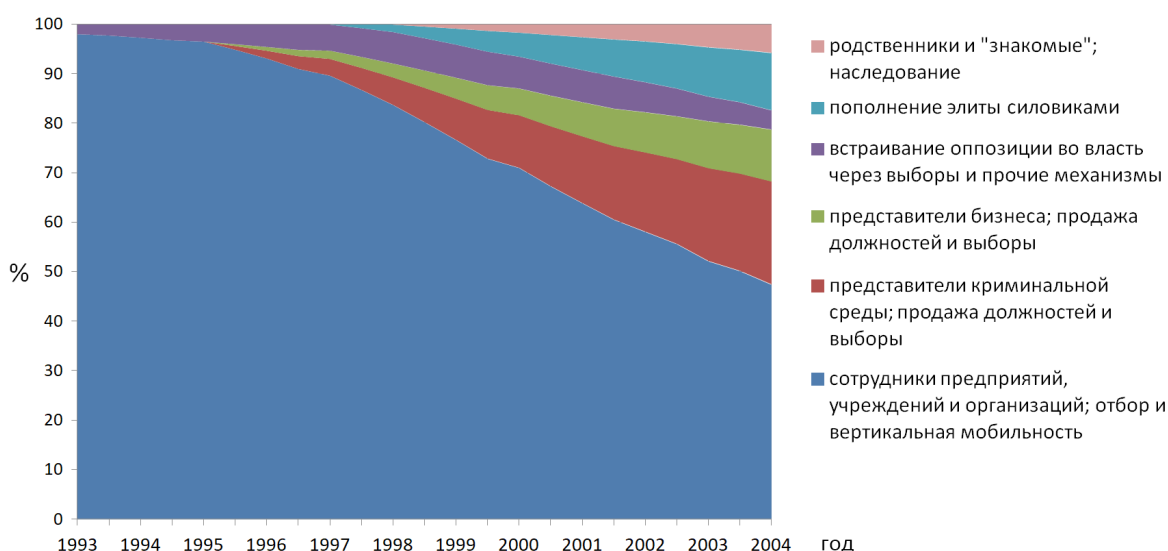


Рис. 6. Состав новобранцев в высшее звено элиты в течение минимального периода полного обновления, альтернативный сценарий

Однако более детальный анализ показывает существование системных проблем, вызванных, очевидно, тем фактом, что система рекрутирования оказалась «замороженной», тогда как вне ее происходили бурные трансформационные процессы. Возникали новые интересы и силы, от которых партия всеми силами пыталась отгородить механизмы рекрутирования.

Во-первых, некоторая часть карьерных номенклатурщиков, вошедших в высшее звено из среднего, должна была быть представителями криминала, которые к тому времени уже прочно обосновались внизу управленческого аппарата. Можно предположить, что это должно было бы привести к сбоям в работе номенклатурных карьерных лифтов.

Во-вторых, динамика численности высшего звена (см. график, рис. 7) показывает существенный провал. Механизмы пополнения элиты недостаточно хорошо работали, чтобы рекрутировать работников, соответствующих требованиям. И в то же время система не была достаточно открыта для внешних акторов, чтобы пополняться более активно из их среды. Ведь эта среда как минимум была чужда партийным интересам. Та позитивная для власти картина, которая наблюдается в составе элиты на рис. 6, на самом деле была сформирована за счет решительного сокращения численности элиты.

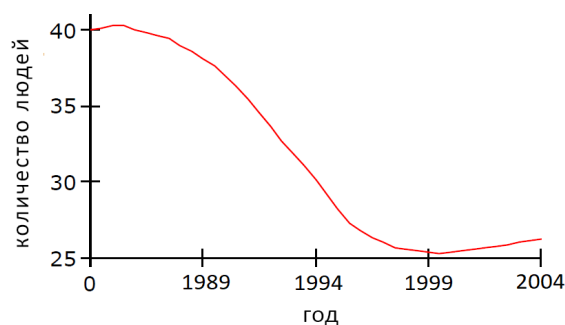


Рис. 7. Динамика численности высшего звена административно-политической элиты, альтернативный сценарий

Конечно, такой существенный кадровый голод в высшем звене элиты может существовать лишь в виртуальной реальности. В действительности очевидно, что проблема недостатка кадров должна была бы решаться «в ручном режиме» — посредством экстраординарных внесистемных решений. В этом случае элита неизбежно должна была бы пополняться людьми, которые нашли «обходные пути наверх». И доля таких людей должна была бы достигать 35 %.

Заключение

Партийный контроль и номенклатурные практики могли бы продолжать существовать, обеспечивая к началу 2000-х гг. более высокие (или, во всяком случае, не менее низкие) качество элит и уровень их лояльности, нежели в реалистичном сценарии. Однако несоответствие системы рекрутирования и общих социально-экономических трансформаций тем не менее существенно деформировало элиту и механизмы ее пополнения. Если в реальности федеральная власть вынуждена была бороться за существование с открыто или почти открыто нелояльными группами, которые доминировали в элитах, то для альтернативного сценария были характерны более скрытые и, тем не менее, также опасные угрозы. Это инфильтрация представителей криминальной среды и «случайных людей», кадровый голод и неспособность наладить динамичные механизмы отбора. Необходимость реформ системы рекрутирования стала очевидна к 2000-м гг. и в реалистичном, и в альтернативном сценариях.

Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 20-011-00105 и № 20-011-31122 совместно с ЭИСИ).

Список литературы

1. Ахременко А.С. Динамический подход к математическому моделированию политической стабильности // Полис. Политические исследования. 2009. № 3. С. 105–112.
2. Гаман-Голутвина О.В. Метафизические измерения трансформаций российских элит // Политическая концептология. 2012. № 3. С. 38–53.
3. Гаман-Голутвина О.В. Политические элиты России: вехи исторической эволюции. М.: РОССПЭН, 2006. 448 с.
4. Гараедаги Дж. Системное мышление. Как управлять хаосом и сложными процессами: Платформа для моделирования архитектуры бизнеса. Минск: Гревцов Букс, 2010. 480 с.
5. Жуков Д.С., Сельцер Д.Г. Системная динамика российской региональной элиты (1985–2019 гг.): альтернативные сценарии // Журнал политических исследований. 2019. Т. 3. № 4. С. 40–74. URL: <https://naukaru.ru/ru/storage/download/44074> (дата обращения: 30.09.2020).
6. Медоуз Д. Азбука системного мышления. М.: Бином, Лаборатория знаний, 2011. 343 с.
7. Сельцер Д.Г. Взлеты и падения номенклатуры. Тамбов: ОГУП «Тамбовполиграфиздат», 2006. 592 с.
8. Сельцер Д.Г. Рекрутирование локальной административной элиты России: исходные данные для построения системно-динамической модели // Pro nunc. Современные политические процессы. 2017. № 2. С. 27–32.
9. Сельцер Д.Г., Жуков Д.С. Рекрутирование региональной административно-политической элиты России, 1990–2017 гг.: подходы к построению системно-динамической модели // Журнал политических исследований. 2017. Т. 1. № 4. С. 78–101. URL: <https://riorgpub.com/ru/nauka/article/19598/view> (дата обращения: 30.09.2020).
10. Федорченко С.Н. Государственная кадровая политика в Советском Союзе и современной России: политико-философский анализ. М.: Научно-издательский центр ИНФРА-М, 2017. 154 с.
11. Форрестер Дж. Мировая динамика. М.: Наука, 1978. 168 с.
12. Чирикова А.Е., Ледяев В.Г. Власть в малом российском городе. М.: Изд. дом НИУ ВШЭ, 2017. 414 с.
13. Чирикова А.Е., Ледяев В.Г., Сельцер Д.Г. Власть в малом российском городе: конфигурация и взаимодействие основных акторов // Полис. Политические исследования. 2014. № 2. С. 88–105.

14. Axelrod R. Modeling Security Issues of Central Asia. Ann Arbor: University of Michigan, 2004. 23 p.
15. Ledyayev V., Chirikova A., Seltser D. Who governs? Power in the local Russian community // Journal of Political Power. 2014. Vol. 7. Is. 2. P. 211–231.
16. Ledyayev V.G., Chirikova A.E. Governors and local elites in Russia: patterns of interaction // European politics and society. 2019. Vol. 20. Is. 3. P. 315–332.
17. Ledyayev V.G., Chirikova A. Power in local Russian communities: patterns of interaction between // Urban Affairs Review. 2017. Vol. 53. Is. 6. P. 990–1024.
18. Ledyayev V.G., Chirikova A.E. Urban regimes in small Russian towns // City & Community. 2019. Vol. 18. Is. 3. P. 812–833.
19. Sharafutdinova G., Turovsky R. The politics of federal transfers in Putin's Russia: Regional competition, lobbying, and federal priorities // Post-Soviet Affairs. 2017. Vol. 33. Is. 2. P. 161–175.
20. Turovsky R., Gaivoronsky Y. Russia's regions as winners and losers: Political motives and outcomes in the distribution of federal government transfers // European Politics and Society. 2017. Vol. 18. No 4. P. 529–551.

References

1. Akhremenko A.S. (2009) *Dinamicheskiy podkhod k matematicheskomu modelirovaniyu politicheskoy stabil'nosti* [A dynamic approach to mathematical modeling of political stability] *Polis. Politicheskie issledovaniya* [Polis. Political Studies]. No. 3. P. 105–112.
2. Gaman-Golutvina O.V. (2012) *Metafizicheskie izmereniya transformatsiy rossiyskikh elit* [Metaphysical dimensions of the transformations of Russian elites] *Politicheskaya kontseptologiya* [Political Conceptology]. No. 3. P. 38–53.
3. Gaman-Golutvina O.V. (2006) *Politicheskie elity Rossii: vekhi istoricheskoy evolyutsiyu* [Political Elites of Russia: Milestones of Historical Evolution] *ROSSPEN* [ROSSPEN]. Moscow. P. 448.
4. Garaedagi J. (2010) *Sistemnoe myshlenie. Kak upravlyat' khaosom i slozhnymi protsessami: Platforma dlya modelirovaniya arkhitektury biznesa* [Systems thinking. How to manage chaos and complex processes: A platform for modeling business architecture] *Grevtsov Buks* [Grevtsov Books]. Minsk. P. 480.
5. Zhukov D.S., Seltser D.G. (2019) *Sistemnaya dinamika rossiyskoy regional'noy elity (1985–2019 gg.): al'ternativnye stsennarii* [System dynamics of the Russian regional elites (1985–2019): alternative scenarios] *Zhurnal politicheskikh issledovaniy* [Journal of Political Research]. Vol. 3. No. 4. P. 40–74. Available at: <https://naukaru.ru/ru/storage/download/44074> (date of access: 30.09.2020).
6. Meadows D. (2011) *Azbuka sistemnogo myshleniya* [The ABC of Systems Thinking] *Binom, Laboratoriya znaniy* [Binom. Laboratory of Knowledge]. Moscow. P. 343.
7. Seltser D.G. (2006) *Vzlety i padeniya nomenklatury* [The ups and downs of the nomenclature] *OGUP «Tambovpoligrafizdat»* [OGUP «Tambovpoligrafizdat»]. Tambov. P. 592.
8. Seltser D.G. (2010) *Rekrutirovanie lokal'noy administrativnoy elity Rossii: iskhodnye dannye dlya postroyeniya sistemno-dinamicheskoy modeli* [Recruiting the local administrative elite of Russia: initial data for building a system-dynamic model] *Pro nunc. Sovremennye politicheskie protsessy* [Pro nunc. Modern political processes]. No. 2. P. 27–32.
9. Seltser D.G., Zhukov D.S. (2017) *Rekrutirovanie regional'noy administrativno-politicheskoy elity Rossii, 1990–2017 gg.: podkhody k postroyeniyu sistemno-dinamicheskoy modeli* [Recruiting the regional administrative-political elite of Russia, 1990–2017: approaches to building a system-dynamic model] *Zhurnal politicheskikh issledovaniy* [Journal of Political Research]. Vol. 1. No. 4. P. 78–101. Available at: <https://riorpub.com/ru/nauka/article/19598/view> (date of access: 30.09.2020).
10. Fedorchenko S.N. (2017) *Gosudarstvennaya kadrovaya politika v Sovetskom Soyuze i sovremennoy Rossii: politiko-filosofskiy analiz* [State personnel policy in the Soviet Union and modern Russia: political and philosophical analysis] *Nauchno-izdatel'skiy tsentr INFRA-M* [Scientific publishing center INFRA-M]. Moscow. P. 154.
11. Forrester J. (1978) *Mirovaya dinamika* [World dynamics] *Nauka* [Nauka]. Moscow. P. 168.
12. Chirikova A.E., Ledyayev V.G. (2017) *Vlast' v malom rossiyskom gorode* [Power in a small Russian town] *Izd. dom NIU VShE* [Ed. House of Higher School of Economics]. Moscow. P. 414.

13. Chirikova A.E., Ledyayev V.G., Seltser D.G. (2014) *Vlast' v malom rossiyskom gorode: konfiguratsiya i vzaimodeystvie osnovnykh aktorov* [Power in a small Russian town: configuration and interaction of the main actors] *Polis. Politicheskie issledovaniya* [Polis. Political Studies]. No. 2. P. 88–105.
14. Axelrod R. (2004) Modeling Security Issues of Central Asia. Ann Arbor. University of Michigan Publ.
15. Ledyayev V., Chirikova A., Seltser D. (2014) Who governs? Power in the local Russian community. *Journal of Political Power*. Vol. 7. Issue 2. P. 211–31.
16. Ledyayev V.G., Chirikova A.E. (2019) Governors and local elites in Russia: patterns of interaction. *European politics and society*. Vol. 20. Issue 3. P. 315–332.
17. Ledyayev V.G., Chirikova A. (2017) Power in local Russian communities: patterns of interaction between legislative and executive branches of local government. *Urban Affairs Review*. Vol. 53. Issue 6. P. 990–1024.
18. Ledyayev V.G., Chirikova A.E. (2019) Urban regimes in small Russian towns. *City & Community*. Vol. 18. Issue 3. P. 812–833.
19. Sharafutdinova G., Turovsky R. (2017) The politics of federal transfers in Putin's Russia: Regional competition, lobbying, and federal priorities. *Post-Soviet Affairs*. Vol. 33. Issue 2. P. 161–175.
20. Turovsky R., Gaivoronsky Y. (2017) Russia's regions as winners and losers: Political motives and outcomes in the distribution of federal government transfers. *European Politics and Society*. Vol. 18. Issue 4. P. 529–551.

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

DOI 10.35264/1996-2274-2020-2-108-124

ОСОБЕННОСТИ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В КОНТЕКСТЕ НАКОПЛЕННОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЩЕРБА

В.М. Питулько, гл. науч. сотр. Санкт-Петербургского научно-исследовательского центра экологической безопасности РАН, д-р геол.-мин. наук, pitulko@rambler.ru

Р.Р. Илющенко, нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, renaldi@extech.ru

В.В. Кулибаба, зав. лаб. Санкт-Петербургского научно-исследовательского центра экологической безопасности РАН, канд. геол.-минер. наук, kouval@rambler.ru

Рецензент: Н.Н. Казанцева

Рациональность природопользования включает оценку и компенсацию экологического ущерба собственнику природных ресурсов, что возможно лишь в актуализированных трехмерных границах его причинения. Преобладают объекты прошлого экологического ущерба регионального и муниципального уровня, риски и воздействия которых слабо изучены и несут в себе потенциал локального вторичного негативного воздействия.

В статье проанализированы вопросы рациональности природопользования при накоплении прошлого экологического ущерба. Обращено внимание на паразитическую природу экономических и экологических составляющих деградации биосферных объектов, где страдающей стороной является не кадастровый земельный участок, а изменяющаяся экосистема, которая в концепции устойчивого развития есть основной объект управления. Однако прошлый экологический ущерб зачастую характеризуется только как плата за загрязнения и утраченные природные ресурсы, что недостаточно для его предупреждения или ликвидации. Применение модели оценки рисков развития специфической микрофлоры на объектах прошлого экологического ущерба в условиях длительного цикла почвенной резистентности позволяет формулировать эффективные решения по стимулированию самовосстановления зональных геосистем, в том числе по обезвреживанию гетерогенных отходов систем водоотведения от тяжелых металлов.

Обсуждена взаимосвязь природно-хозяйственных систем и наносимого ими ущерба, их взаимодействие с экономикой и окружающей средой на муниципальном уровне. Рациональное природопользование в этих условиях часто развивается при конфликте интересов аграрного и горнопромышленного комплексов.

В статье обозначены основные направления системной борьбы с объектами прошлого экологического ущерба на наиболее массовом (муниципальном) уровне. Подключение муниципальных ресурсов к ликвидации объектов прошлого экологического ущерба оптимизирует экологическую реновацию территорий. Методология реабилитации техногенных геосистем, включая и стандартные рекультивационные решения, является лишь тактическим средством ликвидации объектов прошлого экологического ущерба. Стратегия подлинно рационального природопользования состоит в разработке и осуществлении концепции превентивного предотвращения образования объектов прошлого экологического ущерба. Типовые мероприятия по реабилитации земельных ресурсов природно-хозяйственных систем направлены на увеличение их рыночной стоимости, обеспечивая в целом возрастание природного потенциала нарушенных территорий. Предложенные рекомендации затрагивают

не только компенсацию вреда, но и мотивацию по стимулированию ликвидации объектов прошлого экологического ущерба. Оригинальность авторского решения проблемы прошлого экологического ущерба состоит в оценке накопленного экологического вреда только в пределах измененной части геосистемы, а не в пределах всего рассматриваемого кадастрового участка.

Ключевые слова: природно-хозяйственные системы, рациональное природопользование, прошлый экологический ущерб, объекты прошлого экологического ущерба, накопленный экологический вред, Санкт-Петербургская агломерация, муниципалитеты.

FEATURES OF RATIONAL ENVIRONMENTAL USE IN THE RUSSIAN FEDERATION IN THE CONTEXT OF ACCUMULATED ENVIRONMENTAL DAMAGE

V.M. Pitulko, Chief Researcher, Saint-Petersburg Scientific Research Center for Environmental Safety RAS (NICEB RAS), Ph.D., pitulko@rambler.ru

R.R. Ilyushchenko, Head of Department, SRI FRCEC, renaldi@extech.ru

V.V. Kulibaba, Head of Laboratory, St. Petersburg Scientific Research Center for Environmental Safety RAS, Doctor of Geology and Mineralogy, kouval@rambler.ru

Rational nature management includes assessment and compensation of environmental damage to the owner of natural resources, which is possible only within the updated three-dimensional boundaries of its infliction. Objects of past environmental damage at the regional and municipal levels prevail, the risks and impacts of which are poorly studied and carry the potential of local secondary negative impact. The article analyzes the issues of rationality of nature management during the accumulation of past environmental damage. Attention is drawn to the paragenetic nature of the economic and environmental components of the degradation of biosphere objects, where the suffering party is not a cadastral land plot, but a changing ecosystem, which in the concept of sustainable development is the main object of management. However, past environmental damage is often characterized only as a payment for pollution and lost natural resources, which is not enough to prevent or eliminate it. The use of a risk assessment model for the development of specific microflora at sites of past environmental damage under conditions of a long cycle of soil resistance makes it possible to formulate effective solutions to stimulate the self-healing of zonal geosystems, including the neutralization of heterogeneous waste water disposal systems from heavy metals.

The interrelation of natural-economic systems and the damage caused by them, their interaction with the economy and the environment at the municipal level are discussed. Rational use of natural resources in these conditions often develops with a conflict of interests between the agrarian and mining complexes.

The article outlines the main directions of the systemic fight against objects of past environmental damage at the most massive (municipal) level. The connection of municipal resources to the elimination of objects of past environmental damage will optimize the ecological renovation of territories. The methodology for the rehabilitation of technogenic geosystems, including standard remediation solutions, is only a tactical means of eliminating objects of past environmental damage. The strategy of truly rational nature management consists in the development and implementation of the Concept of preventive prevention of the formation of objects of past environmental damage. Typical measures for the rehabilitation of land resources of natural and economic systems are aimed at increasing their market value, providing in general an increase in the natural potential of disturbed territories. The proposed recommendations affect not only compensation for harm, but also the motivation to stimulate the elimination of objects of past environmental damage. The originality of the author's solution to the problem of past environmental damage consists in assessing the accumulated environmental damage only within the changed part of the geosystem, and not within the entire considered cadastral site.

Keywords: natural and economic systems, rational use of natural resources, past environmental damage, objects of past environmental damage, accumulated environmental damage, St. Petersburg agglomeration, municipalities.

Введение

В широком смысле прошлый экологический ущерб (ПЭУ) выражается в разрыве естественных связей в природе. Однако традиционно [1, с. 38] под ним понимается ухудшение качества природных систем, произошедшее в результате нарушения экологических требований и связанного с этим обесценивания материальных и нематериальных благ, включая имущество, жизнь и здоровье человека. Считается, что невозможно компенсировать в стоимостном эквиваленте ущерб, причиненный окружающей среде (невозполнимый вред), а возмещение вреда в натуре возможно лишь частично, и такая компенсация является условной.

Понятие «экологическая реабилитация земель» значительно шире, чем «рекультивация» земельного отвода, занятого природно-хозяйственной системой, в итоге чего только устраняются очевидные изменения геосистемы и обеспечивается ее возврат в доступный хозяйственный оборот. Проекты рекультивации не в состоянии привести к полному восстановлению продуктивности и хозяйственной ценности нарушенных территорий, будучи лимитированными уровнем необратимых остаточных накоплений загрязняющих веществ.

Другими словами, в стоимостном выражении природопользователь оплачивает только то, что, как правило, не может быть восстановлено до естественного состояния, т. е. компенсируемый ущерб плюс некоторую плату (штраф, таксу) за невозполнимые биосферные потери (биоразнообразие, биопродуктивность и т. д.). Такая форма компенсаций широко используется при экологическом проектировании. Например, утрата рыбных ресурсов в зоне действия строительного проекта часто компенсируется финансированием рыборазводных ферм на прилегающей территории [2, с. 424]. Объективность экономической оценки последствий загрязнения окружающей среды и истощения природных ресурсов определяется реальностью материального ущерба от экологических нарушений [3, с. 15; 4, с. 43; 5, с. 120].

Объекты ПЭУ как новое явление антропогенного воздействия вынуждают природопользователей разрабатывать дополнительные меры борьбы с подобной формой вторичного загрязнения агроценозов. Возрастают и оценки приемлемого экологического риска для здоровья населения и окружающей среды в целом [6, с. 25].

Актуальность подобных исследований определяется практической необходимостью адекватной идентификации параметров объектов ПЭУ и закономерностей их развития в различных типах геосистем при обосновании территориальных программ ликвидации накопленного экологического ущерба, что в настоящее время представляет ключевую проблему практического управления для РФ. Недостатки научного обоснования нормативно-методической базы РФ по накопленному экологическому ущербу, свойственные единственному действующему с 2010 г. ГОСТу, приводят к искажению оценок баланса экологической безопасности территорий.

Геосистемы с объектами ПЭУ (ОПЭУ) формируют особую разновидность природно-хозяйственных систем, специфические жизненные циклы которых требуют их выделения и оценки с учетом комплекса ведущих параметров воздействия накопленного экологического ущерба. При этом формы ПЭУ в РФ, как и в любой стране мира, не исчерпываются реестром крупномасштабных техногенных объектов. Наиболее распространены ОПЭУ регионального и муниципального уровней. Риски воздействия таких объектов слабо изучены, что несет в себе потенциал локального возникновения источников опасного вторичного негативного загрязнения и нарушений. Особо следует выделить новую разновидность прошлого экологического ущерба, до сих пор малоисследованную: погребенные и подземные объекты (линзы нефтепродуктов, токсичных захоронений, закачка технологических стоков в пласт, вторичные гидрогеологические миграционные загрязнения и т. п.).

Обращение с ПЭУ отражает величину экологического долга, накопленного обществом [7, с. 10], и уровень рациональности применяемых технологий природопользования в рассматриваемых геосистемах [8, с. 20; 9, с. 30; 10, с. 15]. В данном случае рациональность тождественна экологической безопасности, которая сегодня обеспечивает гармоничную взаимосвязь и саморегуляцию естественных процессов при минимальном риске антропогенного воздействия на окружающую среду и генерируемые в ней негативные изменения [11, с. 205; 12, с. 174].

В основе модели расчета техногенного риска лежит алгоритм прямого баланса воздействия и экосистемного отклика, соответствующий проектно-нормативному состоянию действующей природно-хозяйственной системы (ПХС). Однако появление концепции устойчивого развития [11, с. 80] обозначило необходимость усложнения балансовой схемы рационального природопользования за счет введения в нее дополнительного фактора, учитывающего суммарное воздействие источников накопленного экологического ущерба (вреда).

Согласно этой концепции экосистема становится основным объектом управления в природопользовании, что требует определения реальной ценности услуг, которые экосистема предоставляет человеку, в том числе и для размещения в ней загрязнений. Большинство методов оценки ПЭУ опираются на дефиниции, зачастую характеризующиеся только как платежи за загрязнения и утраченные природные ресурсы, что не может быть достаточным для проработки мероприятий предупреждения или ликвидации ПЭУ [3, 5]. Особое значение имеет углубленная разработка методологии экологической экспертизы схем природопользования в условиях высокой плотности объектов накопленного ущерба. Общая парадигма рационального природопользования при учете ОПЭУ — оценка сверхнормативного уровня накопления загрязнений и величины предотвращенного экологического ущерба.

Под предметом исследования предлагается понимать совокупность структуры и свойств (набор существенных критериев) объектов ПЭУ, устойчивость динамического равновесия, границы выделения, закономерности трансформации и миграции токсичных ингредиентов на разных фазах их жизненного цикла.

Современное состояние исследований

Исторически борьба с влиянием ПЭУ была инициирована деятельностью Агентства по охране окружающей среды США и стран Евросоюза. К стандартным объектам ПЭУ (военные полигоны, промышленные районы, горнодобывающий комплекс, полигоны отходов) в последние десятилетия добавились районы добычи сланцевой нефти и газа (Пенсильвания, Луизиана, Техас) и территории ведения военных действий — в Югославии, Кувейте, Ираке, Сирии, Украине и Чечне [12, с. 209; 13, с. 75].

Организационные, законодательные, финансовые и технологические схемы ликвидации этих объектов за рубежом содержатся в многочисленных публикациях [14–18]. Во главе угла стоят ведение специальных регистровых баз объектов ПЭУ [19, 20], учет экологического состояния земельных участков при сделках с недвижимостью, варьирование стандартов очистки земель на основе критерия пригодности их для конкретного вида функционального использования [21–23]. В США с 1997 г. действует федеральное руководство по обращению с участками — brownfields, аналог российского термина «накопленный экологический вред» (НЭВ) [18]. Шестое издание книги основывается на упрощенном подходе к процессу восстановления загрязненных земель. Новые функции включают обновленный список ключевых проблем и лучших технологических методов управления ими, с включением нормативных требований к стандартам «очистки» или рекультивации ОПЭУ, что, по-видимому, должно быть реализовано и в РФ в форме справочника по вопросу рекультивации НЭВ.

Анализ рассматриваемой проблематики в европейских странах показывает [6, 13, 18], что она развивается по направлениям:

- планирования рекультивации объектов накопленного ущерба на урбанизированных территориях;

— оценки роли ландшафтно-зональных параметров при долговременном развитии объектов ПЭУ и критических показателей нагрузок от них на природно-территориальные комплексы.

Также широко исследуются долговременная динамика сукцессионных процессов среди ОПЭУ [14, 24, 25] и методы мониторинга всех компонентов таких объектов.

В РФ преобладают исследования в традиционном направлении технологической рекультивации нарушенных земель. Существенно меньшее внимание уделяется геоэкологическим аспектам функционирования объектов ПЭУ. Ликвидация ОПЭУ в России осуществляется в рамках одноименной Федеральной целевой программы, выбор объектов для которой основан на представлениях о «горячих экологических точках» (проект ЮНЕП/ГЭФ1 «Российская Федерация — Поддержка Национального плана действий по защите арктической морской среды». М., 2008). Проведение таких работ является общемировой тенденцией [6, 12, 15 и др.]. Однако до сих пор отсутствует единая методология их идентификации, оценки критических уровней воздействия и геоэкологических принципов отбора инвестиционных проектов их рекультивации [18]. В отечественных разработках проявлена целенаправленная специализация: промышленно-технологическая [13] и рационально-природопользовательская [6]. Сфера пользователей также специализирована: ликвидация «горячих точек» в рамках федеральных и региональных программ и восстановление биосферных ресурсов силами муниципальных властей.

В настоящее время регулирование предотвращения загрязнений окружающей среды в национальном законодательстве сопредельных с РФ государств идет по двум направлениям. Во-первых, принимаются нормы, ограничивающие преднамеренное размещение загрязняющих веществ. Во-вторых, вводятся международные стандарты в отношении защитного оборудования объектов ПЭУ, произвольное отступление от которых запрещается. Если раньше экологическая политика формировалась преимущественно на национальном уровне (или координировалась на двусторонней основе), то в настоящее время резко увеличилась потребность в международном сотрудничестве.

Методология исследования

Согласно концепции устойчивого развития поддержание здоровья компонентов природных экосистем является основной целью управления рациональным развитием ПХС. Постепенное изменение состояния окружающей среды ведет к появлению новых геосистем, представляющих объекты экологического ущерба. Данная форма элемента цикла ПХС с негативным воздействием на геосистемы одновременно является частью механизма эколого-экономического управления параметрами экологической безопасности административной территории. В итоге цель проведенного исследования в целом состоит в обеспечении **рационального управления** развитием природно-хозяйственных систем, которая реализуется в статье **через учет влияния на окружающую среду объектов ПЭУ**. Главное — оконтуривание ОПЭУ и расчет эколого-экономического ущерба.

Основными методами изучения элементного анализа почвогрунтов² Санкт-Петербургской агломерации в частном бассейне Финского залива (в границах Ленинградской обл.) являлись стандартные статистические сопоставления, использующие аналогию явлений и логический аппарат, а также картографический метод зонирования территорий по признакам распространенности и экологической опасности определенного вида воздействия от объектов ПЭУ.

Нами прокомментирован понятийный аппарат рационального природопользования, употребляемый в научной и нормативной литературе (табл. 1) и показавший острую необходи-

¹ Экологические «горячие точки» представляют собой источники или виды деятельности человека (или локальное суммарное воздействие), которые неблагоприятно отражаются на его здоровье, состоянии экосистем, их биологическом разнообразии, устойчивости, что влечет за собой негативные экономические последствия (снижение промысловых запасов, рекреационного потенциала, повышение профессиональной заболеваемости и т. д.), вызывая необходимость принятия мер по уменьшению либо ликвидации негативного воздействия.

² Атомно-абсорбционное определение на спектрометре с пламенной атомизацией АА 280FS.

мость уточнения понятий «деградация», «рекультивация», «реабилитация», «санация», «экологический ущерб» и других категорий, которые характеризуют конкретные технико-технологические аспекты воспроизводства земель сельскохозяйственного назначения. Эти термины относятся к различным по содержанию процессам восстановления и улучшения качества нарушенных и деградированных земель.

Таблица 1

Основные положения концепции рационального природопользования*

Понятие	Определение и сущность понятия
Устойчивое развитие	Удовлетворение потребностей нынешнего времени при одновременном сохранении возможности последующим поколениям удовлетворять свои нужды [13]. В области экологии — стабильность физических и экологических систем
Экологический ущерб	Ущерб компонентам окружающей среды и здоровью населения, нанесенный привнесом загрязняющих веществ, выносом элементов плодородия почв, нарушением земель, изменением биологического разнообразия [12, 14, 28, с. 70]
Экономический вред	Уничтожение имущества, или нанесение ему повреждения, или упущенная выгода [5]
Накопленный экологический вред (НЭВ)	Эквивалентные затраты на меры по восстановлению, на предупредительные меры и последующие убытки от неблагоприятных изменений в экосистемах. Убытки от биологических опасностей [12, 14, 28]
Накопленный экологический ущерб (НЭУ)	Сформировавшиеся нарушения здоровья населения и окружающей среды, вызванные прошлой или продолжающейся хозяйственной деятельностью [6, 12, 15]
Экологические «горячие точки»	Территория, в пределах которой техногенные источники загрязнения оказывают неблагоприятное воздействие на окружающую среду [29, с. 33]
Объекты накопленного экологического ущерба (ОНЭУ)	Земельные участки, загрязненные в результате прошлой хозяйственной деятельности и не используемые по этой причине в настоящее время [30, с. 108]
Объекты прошлого экологического ущерба (ОПЭУ)	Техногенно измененные части природной или природно-хозяйственной геосистемы, компоненты которой утратили нормативные показатели качества в результате прошлой хозяйственной деятельности [6, с. 10]

* Составил В.М. Питулько.

Результаты исследования

В статье все эти аспекты рассмотрены на примере Ленинградской обл. — типичного региона РФ с диверсифицированной экономикой.

Исходя из существа ОПЭУ и стадии жизненного цикла их развития были поставлены следующие задачи:

- типизация ОПЭУ и обзор работ по их рекультивации;
- проведение экспериментальной апробации методов оценки для особых типов ОПЭУ — объектов с погребенными компонентами прошлого экологического ущерба, не имеющих адекватных методик первичного мониторинга;
- выбор оптимального типа пространственной ГИС-модели для оценки экологического риска локальных систем с ОПЭУ территорий региона и муниципальных поселений бассейна Финского залива.

Объекты ПЭУ в регионе чрезвычайно разнообразны и находятся на различных стадиях жизненного цикла ПХС горнодобывающих предприятий и депозитариев твердых отходов,

комплексов подводных отвалов, хранилищ канализационных очистных сооружений, разрушенных гидротехнических сооружений, военно-технических и теплоэнергетических объектов [6, с. 358]. Значительные территории занимают нарушенные земли³ и деградировавшие сельскохозяйственные угодья [24, с. 315].

С нормативной стороны подавляющая часть обследованных земель характеризуется допустимым уровнем загрязнения. По отношению загрязненных земель к общей площади муниципальных образований повышенной степенью суммарного загрязнения характеризуются Выборгский, Всеволожский и Подпорожский районы области, где установлены наиболее обширные участки слабого и среднего площадного загрязнения с массовым распространением локальных объектов ПЭУ [6, с. 234]. Сплошной ареал загрязненных почв окружает Санкт-Петербург, захватывая города Всеволожск, Кировск и Гатчину. Большинство районов области имеют слабую степень загрязнения.

По данным [24, с. 318], намечается постепенное распространение химического загрязнения почв региона соединениями тяжелых металлов и токсичной органикой. Начавшись в конце 80-х гг. XX в., в XXI в. «расползание» ареала загрязнения удвоилось. На территории Ленинградской обл. происходили масштабные эколого-экономические события, оставившие на ее землях многочисленные объекты ПЭУ [6, 24, 27].

Несмотря на это, сегодня загрязнение почвы тяжелыми металлами (ТМ) 1–3-го классов опасности отмечается только на локальных участках. Исключение составляют цинк и мышьяк, содержание которых в большей части проб превышает предельно допустимые концентрации (табл. 2), что показывает влияние объектов ПЭУ на уровень фоновых концентраций в природных геосистемах. Анализ пространственно-временных связей этих загрязнений устанавливает следующие ковариационные соответствия с функциональным использованием земель за последние 100 лет: интенсификация аграрного комплекса (As, Zn – форсированное внесение в почву средств защиты растений, органических и минеральных удобрений), развитие добывающего комплекса минеральных удобрений и транспортных сетей (Pb, Cd), фортификационные сооружения периода Великой Отечественной войны (соединения тяжелых металлов).

Таблица 2

Загрязнение проб тяжелыми металлами (n = 1321), по [6]

Элементы	Степень загрязнения		Элементы	Степень загрязнения	
	Число проб	Свыше 5–10 ОДК, %		Число проб	Свыше 5–10 ОДК, %
Pb	249	31	Cd	140	18
As	431	54	Zn	501	63

Предварительные выводы по обращению с проявлениями накопленного ущерба на территории геосистем частного бассейна Финского залива [9, 10] сделаны в процессе анализа разнообразных форм воздействия ПЭУ. Установлено, что специфической («диффузной») формой ПЭУ является эколого-экономический ущерб землям сельскохозяйственного назначения [6, 10, 14]. Появление объектов ПЭУ вблизи сельскохозяйственных земель символизирует развитие опасных для агропродукции уровней загрязнения метилированной ртутью и требует их контроля. Это новое явление антропогенного воздействия обуславливает необходимость обоснования практических мер борьбы с данной формой вторичного загрязнения агроценозов.

³ Нарушение земель представляет собой механическое разрушение почвенного покрова и обусловлено открытыми или закрытыми разработками полезных ископаемых и торфа, строительными и геологоразведочными работами и др.

Существенными факторами деградации сельскохозяйственных угодий являются агро-истощение и неконтролируемая водная эрозия, возникающие в связи с многочисленными ОПЭУ, где формируются азональные миграционные циклы. На заброшенных землях реализуется восстановительная сукцессия рудеральными фитосообществами. Суть реабилитации почв в антропогенно нарушенных ландшафтах заключается в восстановлении экологического баланса выведенных из равновесия геосистем. Самостоятельной научной проблемой является развитие городских почв в урбанизированных ландшафтах, вмещающих объекты ПЭУ.

Сравнительная характеристика муниципальных районов и городских муниципальных образований региона, отражающая плотность распространения объектов ПЭУ наиболее типичного генезиса, была получена по результатам геоэкологического мониторинга, традиционно ориентированного на выявление деградации и загрязнения земельных и почвенных ресурсов региона в сети мониторинговых площадок, выбранных на фоновых участках по эколого-географическому принципу — на разных звеньях ландшафтной катены [30, с. 8].

Агроземы широко представлены на границах селитебных территорий, поэтому почвы этого отдела преобладают среди мониторинговых площадок. На основании анализа данных обобщены варианты наиболее вероятного движения и поведения загрязняющих веществ в почвенном профиле каждой ключевой площадки. Большинство измеренных величин рН вод соответствуют величинам для плодородного слоя почвы, но много и случаев несоответствия — во Всеволожском, Выборгском, Лодейнопольском, Тихвинском и Тосненском муниципальных образованиях. По содержанию гумуса до глубины 20 см почвы большинства исследуемых участков характеризовались уровнем выше «низкого» (1,2–19,1 %). Степень загрязнения почв нефтепродуктами по всем исследуемым муниципальным районам — низкая (кратность к ПДК: 0,005–0,19), бензапиреном — 0,25–29,5.

В составе исследований авторы исходили из следующих положений. Объект ПЭУ представлен техногенно измененными частями геосистемы, характеризующимися такими отклонениями состава и структуры, компоненты которой утратили нормативные показатели качества, что препятствует использованию этих объектов по целевому назначению. По мере хозяйственного использования природная система трансформируется в техногенную геосистему, обладающую специфическими особенностями состава и строения⁴.

Обобщенные данные об экогеохимических параметрах⁵ техногенных систем приведены в табл. 3.

Индивидуализация геохимических спектров выражается их элементными префиксами (Sn, Ag, Cd, Co, Mn), характерными для накопителей твердых отходов. В остальных категориях почвогрунты более гомогенны. Результаты выполненного опробования и оценки экологических рисков деградации изученных земельных массивов, обладающие во многих случаях двух-трехкратной повторностью, показывают, что основу загрязняющих веществ в объектах ПЭУ составляют преимущественно элементы 2-го и 3-го классов опасности.

Ясно, что эти вещества, накапливаясь в субфоновых концентрациях, не в состоянии изменить зональные характеристики почвогрунтов, однако они формируют их местные разновидности, например *редкометалльные дерново-подзолистые (Sn, Ag), асболоновые дерново-карбонатные (Mn, Co)* и др.

⁴ Приказ Росприроднадзора от 25.04.2012 № 193 «Об утверждении Методических рекомендаций по проведению инвентаризации объектов накопленного экологического ущерба»: «Объектом ПЭУ является геосистема, имеющая с поверхности площадь не менее 5 га (оконтуренная по данным лабораторных исследований не менее 5 групповых проб)».

⁵ Приказ Минприроды России от 08.07.2010 № 238 «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды». Использование формулы геохимического спектра при оценке объекта ПЭУ и расчете экологического ущерба.

Таблица 3

Сумма $K_{\text{накопл}}$ загрязняющих веществ (компонентов ПЭУ) в верхнем горизонте почвогрунтов, подстилающих накопленные образования некоторых категорий объектов ПЭУ на территории Ленинградской обл., по [6]

Категория объекта ПЭУ и его геохимический спектр $K_{\text{накопл}}$ каждого компонента к фону	Возраст накопления, лет	Площадь, га	Уровень накопления (сумма $K_{\text{н}}$)		Кол-во изученных ОПЭУ
			ТМ/ТМ-1	Органика	
Свалки ТБО	20,1	2–10	127/66	3,9	68
$\text{SnAg}_{10} - \text{ТМ-1}_5 - \text{ТМ-2}_{2,5} - \text{ТМ-3}_{1,2} - \text{ВРуг}_2 - \text{РСВ}_{0,3} - \text{Oil}_{0,05} - \text{Pest}_{0,01}$					
Несанкционированные свалки	5–20	0,5–4,0	123/80	2,5	98
$\text{ZnCd}_{30}\text{Mn}_{14} - \text{ТМ-1}_8 - \text{ТМ-2}_3 - \text{ТМ-3}_{1,5} - \text{ВРуг}_2 - \text{РСВ}_{0,3} - \text{Oil}_{0,06}$					
Рекультивированные карьеры стройматериалов	20–35	12–28	43/20	3,5	32
$\text{Mn}_{10} - \text{ТМ-1}_6 - \text{ТМ-2}_3 - \text{ТМ-3}_{1,5} - \text{Oil}_{1,8}$					
Иловые площадки	30–40	До 150	130/54	2,8	122
$\text{ТМ-1}_{20} - \text{ТМ-2}_{10} - \text{ТМ-3}_3 - \text{РСВ}_{2,5} - \text{Oil}_{0,03} - \text{Pest}_{0,01}$					
Закрытые навозохранилища	8–13	2	24/0	2,04	29
$\text{ТМ-2}_5 - \text{ТМ-3}_2 - \text{ВРуг}_2 - \text{Oil}_{0,04}$					
Карьеры, рекультивированные мусором	20–35	5–8	43/20	3,5	8
$\text{ТМ-1}_4 - \text{ТМ-2}_2 - \text{ТМ-3}_{1,3} - \text{ВРуг}_{0,2-2} - \text{РСВ}_{0,3-2,5} - \text{Oil}_{0,03-0,06} - \text{Pest}_{0,01}$					

Примечание: ТМ-1 – тяжелые металлы 1-го класса опасности; ТМ-2 – то же, 2-го класса; ТМ-3 – то же, 3-го класса; ВРуг – бензапирен; РСВ – полихлорированные бифенилы; Oil – нефтепродукты; Pest – пестициды.

Границы таких техногенных геосистем не совпадают с контурами кадастровых участков и устанавливаются по санитарно-экологическим значениям концентраций загрязняющих субстанций в компонентах среды, отнесенных к уровню уязвимости ПХС и их депонирующим свойствам с учетом зонального типа биогеохимических процессов в местных почвах. Эти обстоятельства предопределяют использование для оценок ПЭУ данных крупномасштабных экогеохимических съемок (0,4–4,0 пробы/га). Последнее не означает требования повсеместного их проведения (нецелесообразно отбирать сотни тысяч проб в каждом районе). Выбор участков картографирования сводится к зоне информативности соответствующей площадки фонового мониторинга, обладающей величиной $K_{\text{н}}$ зрелого объекта (например, города Волхов, Выборг и Сланцы [24, с. 23]).

Объекты ПЭУ отчетливо структурируются по размерам загрязнений и нарушений: от трансграничных территорий экологического бедствия, имеющих глобально-национальный масштаб, до площадей крупных регионов (в соответствии с отраслевой и ресурсной спецификой), затем следуют промышленные и транспортные кластеры, урбанизированные агломерации и, наконец, повсеместно распространенные мелкие проявления ПЭУ, представленные в основном элементами систем обращения с отходами.

Первоочередной задачей алгоритма оценки любых объектов ПЭУ является достоверное оконтуривание техногенного ландшафта с установлением специфических для каждого типа ПЭУ эколого-экономических воздействий [31, с. 18] в пределах ареалов функционирования ПХС.

Оценка ущерба и потери ценности земель в зависимости от целей (компенсация или реабилитация) выполняется различно [5, с. 120]. В первом случае ущерб равен произведению превышения концентрации на площадь кадастрового участка и на таксу. Недостатки: несколько экосистем в кадастровом участке или изменения фоновых содержаний в автономных и подчиненных геохимических ландшафтах. Для реабилитационных целей ущерб определяется как произведение превышения на площадь нарушения и на таксу. Он имеет составной вид (превышение в пределах каждой экосистемы считается отдельно).

Принятое в настоящее время определение ПЭУ сводится к экономическому содержанию (расчет компенсационных затрат), что не отражает всех его геоэкологических характеристик [29, с. 33]. Тем самым создается барьер между «экологическим» и «экономическим» подходами, утрачивается синергетический эффект рационального природопользования. При обследовании объектов ПЭУ важно правильно определить площадь исследований в пределах кадастровых границ земельного участка. Состояние почвенно-растительного покрова оценивается в контуре зоны воздействия предприятия по данным расчета рассеивания примесей, выбрасываемых предприятием в атмосферный воздух. Зона воздействия предприятия (объекта) на территорию определяется изолинией концентрации примесей в приземном слое атмосферы на уровне $0,05 \text{ ПДК}_{\text{мр}}$. Безусловно, объективными границами объектов НЭВ являются антропогенные геохимические поля, формирующиеся в связи с деятельностью этих объектов, а признаками таких полей должны быть непараметрические показатели⁶.

Экономические вопросы ликвидации накопленного экологического ущерба и восстановления деградированных земель в настоящее время решаются доходным, затратным и сравнительным (учет рынка) методами оценки кадастровых или ландшафтных (экосистемных) участков [5, с. 120]. Область применимости этих методов определяется целью восстановительных работ при формулировке инвестиционных проектов по борьбе с ветровой и водной эрозией, рекультивацией нарушенных земель, деградацией пастбищ в зоне интенсивного земледелия и оленьих пастбищ, ликвидации заболачивания, подтопления земель, вторичного засоления. Ликвидация процессов деградации земель выполняется на основе анализа в бизнес-плане оттоков и притоков реальных денег, что обосновывает экономическую целесообразность проведения этих работ в каждом конкретном случае. Инвестиционные землеустроительные проекты по ликвидации деградированных земель являются важной частью комплекса реабилитационных мероприятий (работ). Влияние ОПЭУ отражается на величине компенсационных затрат на экологическую реабилитацию.

Существенной сложностью является «двойственная» природа ОПЭУ. Данный элемент цикла природно-хозяйственной системы одновременно представляет собой часть механизма эколого-экономического управления параметрами экологической безопасности административной территории, и поэтому рациональное природопользование в этих условиях часто развивается при конфликте интересов аграрного и горнопромышленного комплексов.

Показательным примером служит ситуация в Новохоперском районе Воронежской обл., где в 15 км от Хоперского государственного биосферного заповедника запланировано строительство нескольких рудодобывающих шахт, обогатительного комбината, производящего медно-никелевый концентрат, хранилища отходов горного производства, водохранилища, складов готовой продукции, грузового железнодорожного терминала. Эти инвестиции призваны заместить традиционные уклады хозяйствования в регионе, где годовой

⁶ Непараметрические показатели не зависят от размеров оцениваемых объектов и территорий, например медиана, в отличие от среднеарифметического. Кроме того, медиана — устойчивая робастная оценка (даже в присутствии до 75 % проб с аномальными значениями).

оборот сельскохозяйственной продукции превышает 300 млн долл/год, а еланский чернозем экспонировался как эталон на Всемирной выставке достижений техники и науки в 1889 г. [32, с. 12].

Еланское месторождение, известное с 60-х гг. XX в., не планировалось к разработке в силу агропромышленного профиля региона, сложности залегания полезных ископаемых и близости природоохранных объектов [33, с. 240]. При реализации проекта качество традиционной продукции на этой части Воронежской обл. значительно снизится. Пострадают десятки сельхозпредприятий, оказавшихся в зоне промышленного загрязнения.

Роль перечисленных в табл. 1 понятий в обеспечении рационального природопользования неравнозначна. Конкретными элементами управления охраной природы, где возможно устранение экологического ущерба/вреда, являются измененные части земельных участков или исходной геосистемы, ограниченные физическими, агрохимическими или экогеохимическими контурами загрязнений и нарушений, т.е. ОНЭУ и ОПЭУ в использованной выше нотации. Очевидно, что такие объекты возникают стихийно, как и несанкционированные скопления отходов, часто не имея установленного виновника или собственника.

На региональном уровне (рис. 1) плотность их может достигать 7 объектов на 1 км² [6, с. 362; 24, с. 401], на муниципальном – до 5–10 объектов для поселений первого уровня. Таким образом, по экспертным оценкам, количество ОПЭУ, например, в Ленинградской обл. может составлять 30–50 тыс., включая несанкционированные свалки бытовых отходов.

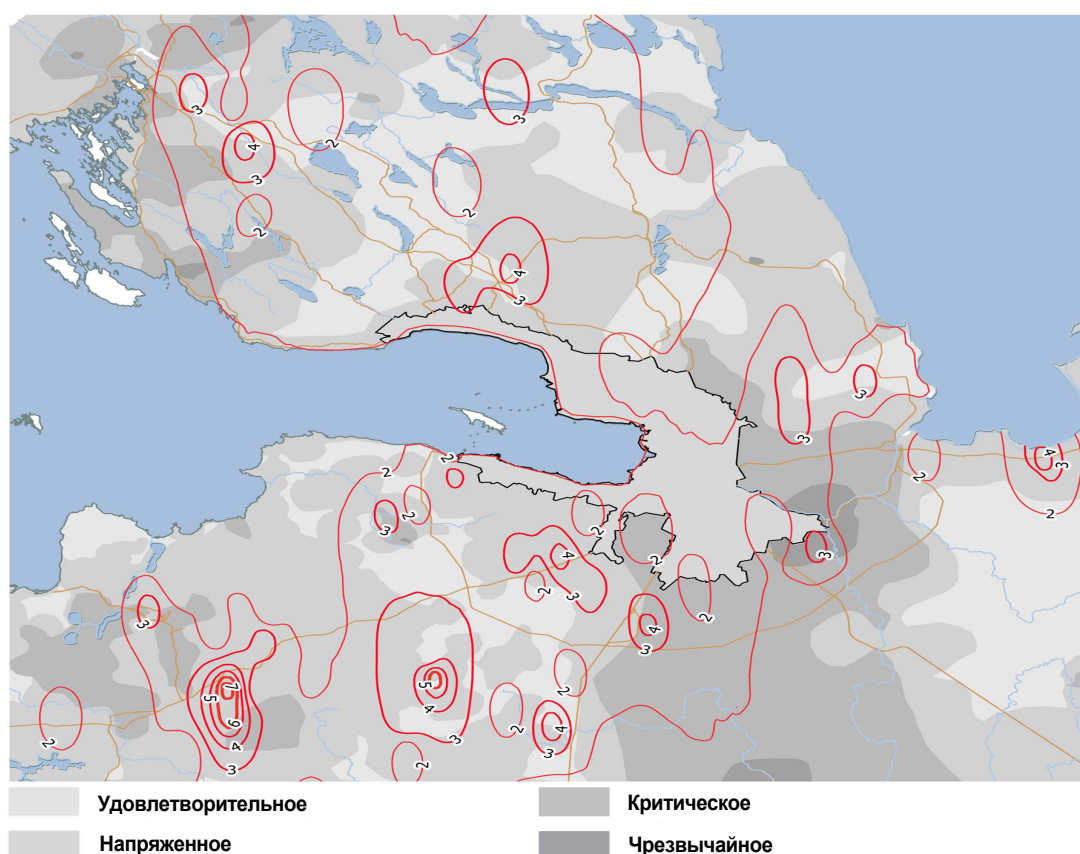


Рис. 1. Качество почвогрунтов по Z_c (ухудшается с густотой заливки) и плотность ОПЭУ (изолинии) для центра Санкт-Петербургской агломерации по состоянию на 01.01.2019 (данные авторов)

Очевидно, что уровень накопленного экологического ущерба в стране не исчерпывается каталогом «горячих точек». Применительно к ОПЭУ риски и угрозы НЭУ еще не идентичны последним, но уже несут в себе возможности локального возникновения потенциальных источников вторичного загрязнения.

Затраты на ликвидацию вреда окружающей среде, устранение негативных последствий, минимизацию угроз в экологических «горячих точках» выливаются в огромные суммы [13, 15]. Чтобы оценить затраты и объемы работ по всем 340 «горячим точкам» страны, необходимо подготовить проект по каждой из точек и утвердить программу «общей уборки» страны. Такие многомиллиардные затраты могут окупиться через 20–30 лет. В то же время подключение муниципальных ресурсов к ликвидации ОПЭУ может ускорить процессы экологической реновации.

Земельные ресурсы, независимо от их функционального использования, в общем случае имеют следующий жизненный цикл (рис. 2).



Рис. 2. Схема эволюции жизненного цикла использования земельных ресурсов (составил В.М. Питулько по материалам [6])

Заложенная в пределах исходного земельного массива любая ПХС в период ее эксплуатации производит нарушение и загрязнение земельного отвода и сопредельных водных ресурсов. В результате сбросов и выбросов загрязняющих веществ, а также при обращении потоков отходов происходит формирование проявлений накопленного экологического ущерба в санитарно-защитной зоне хозяйственного объекта и на прилегающих площадях. Рекомендации по сдерживанию этих процессов формируются при использовании современных версий имитационных моделей влияния ПЭУ, основанных на фундаментальных иссле-

дованиях физических, физико-химических и биохимических процессов в биосфере (по аналогии с появившимися в начале XXI в. новыми версиями моделей «почва — растения» Pestins [28, с.70]), а в местах, где нанесенный экологический вред становится препятствием для деятельности ПХС и угрожает здоровью людей, возникает необходимость экологической реабилитации территорий, завершающейся после вывода ПХС из оборота рекультивацией земельного отвода.

В данном случае ПХС предстает как бы первой ступенью формирования ОПЭУ при взаимодействии процессов производства и потребления. В парагенетической связи с рекультивированной ПХС, к примеру в границах земельного отвода, всегда остается ряд особых техногенных геосистем в виде ОПЭУ, обращение с которыми возможно либо путем изменения функционального использования сопряженных земельных участков, либо путем ликвидации экологического дискомфорта (адаптивно-ландшафтная система земледелия, ресурсосберегающие технологии и органическое земледелие) [34, с. 46].

Теоретически экосистема может постепенно восстанавливаться от возмущения со скоростью, пропорциональной той степени, в которой возмущения уменьшились. В этом случае восстановление потребует столетий, если не тысячелетий, учитывая масштабы текущих воздействий. Кроме того, экосистемы могут достичь критического порога и перейти в альтернативное состояние.

Зачастую нанесенный природе вред можно компенсировать за гораздо меньший срок, чем считалось ранее [22, с. 517]. После снятия антропогенной нагрузки эффективность реабилитации нарушенных земель процессами самовосстановления неизбежно возрастает, после разрешения экологических кризисов активизируется аборигенная биота.

Основные выводы

Проведенный анализ объектов исследований приводит к ряду методологических следствий.

1. Пространственно-временные закономерности возникновения объектов ПЭУ различного иерархического уровня целесообразно изучать в составе водохозяйственных экорегионов методом одноаспектного картирования (ведущие компоненты: устойчивость, уязвимость, оценка компенсационных затрат, гидроэкологические параметры воздействия). Такой комплекс данных создает научное обеспечение решения задач пространственного прогнозирования, предупреждения и минимизации экологического ущерба и связанных с ними проявлений чрезвычайных экологических ситуаций.

2. Применение модели оценки рисков развития специфической микрофлоры на объектах ПЭУ в условиях длительного цикла почвенной резистентности позволяет формулировать эффективные решения по стимулированию самовосстановления зональных геосистем, в том числе по обезвреживанию гетерогенных отходов систем водоотведения от тяжелых металлов.

3. При крупномасштабном картировании геосистем с накопленным экологическим ущербом требуется адаптация геоинформационных технологий в рамках моделей многовариантного пространственного анализа.

Заключение

Минимизация угроз человеческой жизни и негативных социально-экономических последствий в зоне влияния ОПЭУ, несомненно, требует адекватной политики на всех уровнях управления. Задача минимизации экологических рисков, обеспечивающих устойчивое развитие общества и рациональное природопользование, решается не только на мировых форумах и на государственном уровне, но и каждым субъектом РФ и даже каждым муниципальным поселением. Объекты ПЭУ, находящиеся в территориальных границах конкретного субъекта, доступны любому органу местного самоуправления (свалки отходов, скопления мусора, потенциально опасные для людей производства, загрязнение воздуха, почвы и воды) и, таким образом, вполне могут быть ими контролируемы. В качестве дополнительных критериев можно использовать данные о состоянии водисточников питьевого назначения и критерии оценки деградации наземных экосистем, в первую очередь касающиеся степени

нарушенности территорий и наличия зон развития опасных геологических (экзогенных) процессов.

Очевидно, что сотни тысяч объектов ПЭУ, накопленных на территории РФ, невозможно ликвидировать в обозримое время только при реализации федеральных целевых программ. Поэтому настойчивые усилия по ликвидации (или функциональному перепрофилированию объектов ПЭУ при муниципальном природопользовании) в конечном счете приведут к постепенному сокращению экологического дискомфорта. Ужесточение норм проектирования и эксплуатации имеет тот же вектор.

Примененные методологические принципы и складывающаяся концепция превентивного предотвращения образования объектов прошлого экологического ущерба в природно-хозяйственных регионах показывают, что с их помощью могут быть разработаны типовой состав и содержание мероприятий по ликвидации экологического вреда от прошлой хозяйственной деятельности и его реабилитации для ОПЭУ наиболее массового уровня – в пределах муниципальных образований.

Экономический эффект обеспечивается за счет увеличения рыночной стоимости деградированных земель после их реабилитации. Экологический эффект заключается в восстановлении природного потенциала почв и агроландшафтов.

Кроме компенсации вреда, необходимо предусмотреть санкции за допущенный ПЭУ, обеспечить аккумуляцию средств в специализированных фондах, аудирование и страхование земельных ресурсов, а также их перераспределение в пользу наиболее эффективно и рационально хозяйствующих субъектов.

Вклад в стратегию подлинно рационального природопользования авторы видят в разработке и осуществлении концепции превентивного предотвращения образования объектов прошлого экологического ущерба. Рекомендации авторов затрагивают не только компенсацию вреда, но и мотивацию по стимулированию ликвидации ОПЭУ.

Статья подготовлена в рамках исследования «Систематизация, идентификация и методы оценки объектов прошлого экологического ущерба в частном бассейне Финского залива», входящего в подраздел № 137 Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг., в части научной проблематики рационального природопользования в условиях прошлого накопленного экологического ущерба.

Список литературы

1. Протасов В.Ф. Экология, здоровье и природопользование в России. М.: Финансы и статистика, 2011. 671 с.
2. Экологическое проектирование и экспертиза. Ростов н/Д.: Феникс, 2016. 471 с.
3. Лукьянчиков Н.Н., Потравный И.М. Экономика и организация природопользования. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2015. 687 с.
4. Прошлый (накопленный) экологический ущерб: проблемы и решения. Источники информации для поиска технологий ремедиации // Экологический вестник России. 2015. № 7. С. 41–48.
5. Пестриков В.С., Шубич М.П., Носов С.И. Экономическая эффективность ликвидации накопленного экологического ущерба и восстановления деградированных земель: монография / под ред. С.И. Носова. М.: Проспект, 2016. 208 с.
6. Питулько В.М., Кулибаба В.В. Реновация природных систем и ликвидация объектов накопленного экологического ущерба. М.: ИНФРА-М, 2017. 497 с.
7. Титова Г.Д. Концепция экологического долга: развитие и возможные направления применения на практике // Региональная экология. 2016. № 1 (43). С. 7–14.
8. Питулько В.М., Кулибаба В.В., Дрегуло А.М., Петухов В.В. Загрязнение тяжелыми металлами агроценозов от объектов прошлого экологического ущерба // Безопасность в техносфере. 2016. Т. 5. № 2. С. 18–24.

9. Питулько В.М., Иванова В.В., Кулибаба В.В. Экологическая безопасность морских природно-хозяйственных систем Российской Прибалтики. М.: ИНФРА-М, 316 с.
10. Прошлый экологический ущерб в Российской Федерации. Доклад Всемирного Банка. 2007. 49 с. URL: <http://expert.gost.ru/EC/DOC/PECU.pdf> (дата обращения: 13.06.2020).
11. Стратегия и проблемы устойчивого развития России в XXI веке / под ред. А.Г. Гранберга. М.: Экономика, 2002. 414 с.
12. Питулько В.М., Кулибаба В.В., Растоскуев В.В. Техногенные системы и экологический риск. М.: Изд. дом «Академия», 2013. 380 с.
13. Соловьянов А.А., Чернин С.Я. Ликвидация накопленного вреда окружающей среде в Российской Федерации. М.: Наука РАН, 2017. 456 с.
14. Minkina T.M. Ecological resistance of the soil-plant system to contamination by heavy metals // Journal of Geochemical Exploration, Phytoremediation of polluted soils, Vol. 123, December 2012. P. 33–40.
15. Beins K., Lester S. Superfund: polluters pay so children can play. 35th Anniversary. The Center for Health, Environment & Justice (CHEJ), 2015. 80 p.
16. Brownfields Road Map to Understanding Options for Site Investigation and Cleanup. Sixth Edition. EPA USA, 2018. 86 p.
17. DEFRA and Welsh Assembly Government, The Environmental Damage Regulations, Preventing and Remedying Environmental Damage, 2009. 10 p. URL: <http://archive.DEFRA.gov.uk/environment/policy/liability/pdf/quick-guide-regs09.pdf> (дата обращения: 13.06.2020).
18. Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR), Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, 4th Edition, 2007. Last update on the 30 Mar 2018 15:47:08-0500.
19. In Situ Treatment Technologies for Contaminated Soil: Engineering Forum Issue Paper, OSWER, EPA 542-F-06-013, 2006. 35 p.
20. Report, The Center for Health, Environment & Justice, 2015. URL: <http://www.chej.org> (дата обращения: 13.06.2020). Last update on the 13 Oct 2018 12:13:03-0500.
21. Soil Protection and Contaminated Sites Rehabilitation Policy, Canada, Report HÉBERT, Jocelyne, et Julie Bernard. 2013. Bilan sur la gestion des terrains contaminés au 31 décembre 2010, 31 p.
22. Dobson A.P., Bradshaw A.D., Baker A.J.M. Hopes for the future: Restoration ecology and conservation biology // Science, 1997, 277: 515–522 p.
23. Jones H.P., Schmitz O.J. Rapid Recovery of Damaged Ecosystems // PLoS ONE, 2009, 4(5): e5653.
24. О состоянии окружающей среды в Ленинградской области / Комитет по природным ресурсам Ленинградской области. СПб., 2010. 429 с.; СПб., 2015. С. 271.
25. Воронюк Г.А., Питулько В.М., В.В. Кулибаба. Пространственно-временная изменчивость состава подземных вод на территории Ижорского плато // Региональная экология. 2015. № 6 (41). С. 67–79.
26. Новожилов К.В., Сухорученко Г.И., Семенова Н.Н., Врогарев С.А., Питулько В.М. Оценка экологической опасности пестицидов для агробиоценозов // Региональная экология. 2010. № 1–2 (28). С. 73–79.
27. Стратегическая программа действий по охране окружающей среды Арктической зоны Российской Федерации. М., 2009. URL: http://www.morskayakollegiya.ru/os/materialy_zaseda/20090707-135809-7472.doc (дата обращения: 13.06.2020).
28. Потравный И.М., Гассий В.В. Методология проектного управления ликвидацией накопленного экологического ущерба // Вестник РФФИ. Гуманитарные и общественные науки. 2017. № 2. С. 68–76.
29. Генгут И.Б. К вопросу о развитии понятийного аппарата экономики природопользования в контексте накопленного экологического ущерба // Горизонты экономики. 2015. № 1 (20). С. 31–34.
30. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов (ландшафтно-геохимические процессы). М., 2007. 350 с.
31. Практическое пособие по разработке раздела «Оценка воздействия на окружающую среду» при обосновании инвестиций в строительство предприятий и сооружений. М.: Центринвестпроект, 1998. 60 с.

32. Бойко П.С. Сульфидные медно-никелевые руды Еланского и Ёлкинского месторождений. Воронеж, 2014. 15 с.
33. Чернышов Н.М. Сульфидные медно-никелевые месторождения юго-востока Воронежского кристаллического массива (породы, руды, генетические особенности). Воронеж: Изд-во Воронежского гос. ун-та, 1971. 312 с.
34. Бессонова Е.А. Эколого-экономическая реабилитация нарушенных и деградированных сельскохозяйственных земель. Курск: Изд-во ООО «Планета», 2011. 240 с.

References

1. Protasov V.F. (2011) *Ekologiya, zdorov'e i prirodopol'zovanie v Rossii* [Ecology, health and nature management in Russia] *Finansy i statistika* [Finance and Statistics]. Moscow. P. 671.
2. *Ekologicheskoe proektirovanie i ekspertiza* (2016) [Environmental design and expert examination] *Feniks* [Phoenix]. Rostov-on-Don. P. 471.
3. Lukyanchikov N.N., Potravny I.M. (2015) *Ekonomika i organizatsiya prirodopol'zovaniya* [Economics and organization of environmental management] *YuNITI-DANA* [UNITI-DANA]. Moscow. P. 687.
4. *Proshlyy (nakoplenyy) ekologicheskiy ushcherb: problemy i resheniya. Istochniki informatsii dlya poiska tekhnologiy remediatsii* [Past (accumulated) environmental damage: problems and solutions (2015) Sources of information for searching for remediation technologies] *Ekologicheskiy vestnik Rossii* [Ecological Bulletin of Russia]. No. 7. P. 41–48.
5. Pestrikov V.S., Shubich M.P., Nosov S.I. (2016) *Ekonomicheskaya effektivnost' likvidatsii nakoplenogo ekologicheskogo ushcherba i vosstanovleniya degradirovannykh zemel': monografiya. Pod red. S.I. Nosova* [Prospect Economic efficiency of elimination of accumulated environmental damage and restoration of degraded lands: monograph. Ed. S.I. Nosov]. Prospect. Moscow. P. 208.
6. Pitulko V.M., Kulibaba V.V. (2017) *Renovatsiya prirodnykh sistem i likvidatsiya ob'ektov nakoplenogo ekologicheskogo ushcherba* [Renovation of natural systems and elimination of objects of accumulated environmental damage] *INFRA-M* [INFRA-M]. Moscow. P. 497.
7. Titova G.D. (2016) *Kontseptsiya ekologicheskogo dolga: razvitie i vozmozhnye napravleniya primeneniya na praktike* [The concept of ecological debt: development and possible directions of application in practice] *Regional'naya ekologiya* [Regional ecology]. No. 1 (43). P. 7–14.
8. Pitulko V.M., Kulibaba V.V., Dregulo A.M., Petukhov V.V. (2016) *Zagryaznenie tyazhelymi metallami agrotsenozov ot ob'ektov proshlogo ekologicheskogo ushcherba* [Heavy metal contamination of agrocenoses from objects of past environmental damage] *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in the technosphere]. T. 5. No. 2. P. 18–24.
9. Pitulko V.M., Ivanova V.V., Kulibaba V.V. *Ekologicheskaya bezopasnost' morskikh prirodno-khozyaystvennykh sistem Rossiyskoy Pribaltiki* [Ecological safety of marine natural and economic systems of the Russian Baltic] *INFRA-M* [INFRA-M]. Moscow. P. 316.
10. *Proshlyy ekologicheskiy ushcherb v Rossiyskoy Federatsii. Doklad Vsemirnogo Banka* [Past environmental damage in the Russian Federation] (2007). World Bank Report. Available at: <http://expert.gost.ru/EC/DOC/PECU.pdf> (date of access: 13.06.2020).
11. *Strategiya i problemy ustoychivogo razvitiya Rossii v XXI veke. Pod red. A.G. Granberga* [Strategy and problems of sustainable development of Russia in the XXI century. Ed. A.G. Granberg] *Ekonomika* [Economics]. Moscow. P. 414.
12. Pitulko V.M., Kulibaba V.V., Rasoskuev V.V. (2013) *Tekhnogennye sistemy i ekologicheskiy risk* [Man-made systems and environmental risk] *Izd. dom «Akademiya»* [Ed. house «Academy»]. Moscow. P. 380.
13. Solovyanov A.A., Chernin S.Ya. (2017) *Likvidatsiya nakoplenogo vreda okruzhayushchey srede v Rossiyskoy Federatsii* [Elimination of accumulated environmental damage in the Russian Federation] *Nauka RAN* [Nauka RAS]. Moscow. P. 456.
14. Minkina T.M. (2012) Ecological resistance of the soil-plant system to contamination by heavy metals. *Journal of Geochemical Exploration, Phytoremediation of polluted soils*, Vol. 123, December. P. 33–40.
15. Beins K., Lester S. (2015) Superfund: polluters pay so children can play. 35th Anniversary. The Center for Health, Environment & Justice (CHEJ). 80 p.

16. Brownfields Road Map to Understanding Options for Site Investigation and Cleanup (2018) Sixth Edition. EPA USA. 86 p.
17. DEFRA and Welsh Assembly Government, The Environmental Damage Regulations, Preventing and Remedying Environmental Damage (2009). 10 p. Available at: <http://archive.DEFRA.gov.uk/environment/policy/liability/pdf/quick-guide-regs09.pdf> (date of access: 13.06.2020).
18. Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR), Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, 4th Edition, 2007. Last update on the 30 Mar 2018 15:47:08-0500.
19. In Situ Treatment Technologies for Contaminated Soil: Engineering Forum Issue Paper (2006). OSWER, EPA 542-F-06-013. 35 p.
20. Report, The Center for Health, Environment & Justice (2015). Available at: <http://www.chej.org> (date of access: 13.06.2020). Last update on the 13 Oct 2018 12:13:03-0500.
21. Soil Protection and Contaminated Sites Rehabilitation Policy, Canada, Report HÉBERT, Jocelyne, et Julie Bernard (2013). Bilan sur la gestion des terrains contaminés au 31 décembre 2010, 31 p.
22. Dobson A.P., Bradshaw A.D., Baker A.J.M. (1997) Hopes for the future: Restoration ecology and conservation biology. *Science*. 277: 515–522 p.
23. Jones H.P., Schmitz O.J. Rapid Recovery of Damaged Ecosystems. *PLoS ONE*, 2009, 4(5): e5653.
24. *O sostoyanii okruzhayushchey sredy v Leningradskoy oblasti* (2010) [On the state of the environment in the Leningrad region] *Komitet po prirodnym resursam Leningradskoy oblasti* [Committee on natural resources of the Leningrad region]. St. Petersburg. P. 429.
25. Voronyuk G.A., Pitulko V.M., V.V. Kulibaba. (2015) *Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' sostava podzemnykh vod na territorii Izhorskogo plato* [Spatio-temporal variability of the composition of groundwater on the territory of the Izhora plateau] *Regional'naya ekologiya* [Regional ecology]. No. 6 (41). P. 67–79.
26. Novozhilov K.V., Sukhoruchenko G.I., Semenova N.N., Vrogarev S.A., Pitulko V.M. (2010) *Otsenka ekologicheskoy opasnosti pestitsidov dlya agrobiotsenozov* [Assessment of the ecological hazard of pesticides for agrobiocenoses] *Regional'naya ekologiya* [Regional ecology]. No. 1–2 (28). P. 73–79.
27. *Strategicheskaya programma deystviy po okhrane okruzhayushchey sredy Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii* [Strategic action program for environmental protection of the Arctic zone of the Russian Federation] (2009) Moscow. Available at: http://www.morskayakollegiya.ru/os/materialy_zaseda/20090707-135809-7472.doc (date of access: 13.06.2020).
28. Potravny IM, Gassiy V.V. (2017) *Metodologiya proektnogo upravleniya likvidatsiyey nakoplennoy ekologicheskoy ushcherby* [Methodology of project management for elimination of accumulated environmental damage] *Vestnik RFFI. Gumanitarnye i obshchestvennye nauki* [RFFB Bulletin. Humanities and social sciences]. No. 2. P. 68–76.
29. Gengut I.B. (2015) *K voprosu o razvitiy ponyatiynogo apparata ekonomiki prirodopol'zovaniya v kontekste nakoplennoy ekologicheskoy ushcherby* [On the development of the conceptual apparatus of nature management economics in the context of accumulated environmental damage] *Gorizonty ekonomiki* [Horizons of Economics]. No. 1 (20). P. 31–34.
30. Glazovskaya M.A. (2007) *Geokhimiya prirodnikh i tekhnogennykh landshaftov (landshaftno-geokhimi-cheskie protsessy)* [Geochemistry of natural and technogenic landscapes (landscape-geochemical processes)]. Moscow. P. 350.
31. *Prakticheskoe posobie po razrabotke razdela «Otsenka vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu» pri obosnovanii investitsiy v stroitel'stvo predpriyatiy i sooruzheni* [Practical guide for the development of the section «Environmental Impact Assessment» when justifying investments in the construction of enterprises and structures (1998) *Tsentrinvestproekt* [Tsentrinvestproekt]. Moscow. P. 60.
32. Boyko P.S. (2014) *Sul'fidnye medno-nikelevye rudy Elanskogo i Elkinskogo mestorozhdeniy* [Sulphide copper-nickel ores of the Elansky and Yolkinsky deposits]. Voronezh. P. 15.
33. Chernyshov N.M. (1971) *Sul'fidnye medno-nikelevye mestorozhdeniya yugo-vostoka Voronezhskogo kristallicheskogo massiva (porody, rudy, geneticheskie osobennosti)* [Sulphide copper-nickel deposits in the southeast of the Voronezh crystalline array (massif) (rocks, ores, genetic characteristics)] *Izd-vo Voronezhskogo gos. un-ta* [Voronezh State University Publishing House]. Voronezh. P. 312.
34. Bessonova E.A. (2011) *Ekologo-ekonomicheskaya reabilitatsiya narushennykh i degradirovannykh sel'skokhozyaystvennykh zemel'* [Ecological and economic rehabilitation of disturbed and degraded agricultural lands] *Izd-vo OOO «Planeta»* [Publishing house of LLC «Planet»]. Kursk. P. 240.

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

DOI 10.35264/1996-2274-2020-2-125-138

УПРАВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИМИ ПУЧКАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЗАИМНО ДОПОЛНЯЮЩИХ СКАНАТОРОВ

В.Г. Выскуб, гл. научн. сотр. ФГБУ НИИ РИНКЦЭ, д-р техн. наук, проф.,
vyskub08@mail.ru

Рецензент: В.Е. Болнокин

Решением задач управления оптическим сканирующим пучком в ряде приложений могут быть устройства на основе сканаторов (дефлекторов, сканеров) со взаимно дополняющими характеристиками. В работе рассмотрены оптико-механические, электронные, акустооптические, электрооптические, а также микроэлектромеханические (MEMS), микрооптические электромеханические (MOEMS) сканаторы в качестве составляющих устройств комбинированного сканирования. Приведены качественные показатели составного сканирования, в том числе быстродействия, разрешения, точности управления оптическим пучком, размеры сканируемого пространства и др. Наряду с преимуществами отмечены сложности, возникающие при реализации комбинированного сканирования.

Ключевые слова: составной сканатор, оптико-механический сканатор, акустооптический дефлектор, электрооптический дефлектор, магнитоэлектрический привод, оптическое согласование, динамические характеристики.

CONTROLLING OPTICAL BEAMS USING MUTUALLY COMPLEMENTARY SCANNERS

V.G. Vyskub, Chief Researcher, SRI FRCEC, Ph.D., Professor, vyskub08@mail.ru

Devices based on scanners (deflectors, scanning devices) with mutually complementary characteristics can be a solution to control problems of an optical scanning beam in a number of applications. The paper considers optical-mechanical, electronic, acousto-optical, electro-optical, as well as microelectromechanical (MEMS), micro-optical electromechanical (MOEMS) scanners as components of combined scanning devices. The qualitative indicators of composite scanning, including the speed, resolution, control accuracy of the optical beam, the dimensions of the scanned space, etc., are given. Along with the advantages, the difficulties arising in the implementation of combined scanning are noted.

Keywords: composite scanner, optical-mechanical scanner, acousto-optical deflector, electro-optical deflector, magnetoelectric drive, optical matching, dynamic characteristics.

Введение

Инструментом управления оптическими пучками являются сканаторы, выбор которых определяется их достоинствами в отношении наиболее важных характеристик для решения задачи и удовлетворительными для этого решения остальными характеристиками. Анализ известных методов и устройств сканирования показывает сложность определения лучшего по всем характеристикам устройства и необходимость принятия в связи с этим компромиссных решений. Средством улучшения процессов сканирования может быть использование взаимно дополняющих сканаторов, основанных на различных принципах работы.

Избирательное сочетание сканаторов позволяет улучшить такие характеристики систем, в составе которых они работают, как пространственное разрешение и быстродействие, точность перемещения оптического пучка, расширить спектральный оптический диапазон и др. В то же время при организации составного сканирования необходимо учитывать особенности сопрягаемых устройств отклонения пучков, их приводов, измерительных систем, обеспечивать динамическое, точностное и алгоритмическое согласование, проводить в некоторых случаях сложную юстировку элементов оптических схем.

В статье рассматриваются технические решения составного сканирования для прикладных задач считывания и воспроизведения информации в научных исследованиях, медицине, биологии, технологиях материалообработки и др.

Основные характеристики типовых сканаторов

Выбор комбинации сканаторов ограничен их предельными техническими характеристиками [1]. Для зеркальных систем предельная разрешающая способность достигается возможностями создания фокусирующей оптикой на заданном поле пятна минимального диаметра, исключением искажений, вносимых самим сканатором, путем повышения качества отражающей поверхности, увеличения размеров зеркала сканатора. В зависимости от привода (пьезоэлектрический, магнитоэлектрический, электростатический и др.) возникают ограничения быстродействия, размеров и массы отклоняющих зеркал. Величина максимального разрешения ограничена дифракционным пределом.

Преимущество зеркальных систем заключается в возможности одновременной работы в различных диапазонах спектра, высоком коэффициенте отражения, зависящем от зеркального покрытия и длины волны падающего излучения. При соответствующей обработке сверхгладких зеркальных поверхностей со средним квадратическим значением шероховатости до 100 \AA коэффициенты отражения составляют не менее 99 % [2]. Зеркальные системы позволяют работать с пучками широкого диапазона сечения. Для достижения высокой точности адресации и стабилизации светового пучка применяются замкнутые по углу системы с прецизионными измерителями и соответствующими законами управления. Ограничение световой мощности зеркальных устройств связано с возникающей тепловой неустойчивостью, которая зависит от длительности воздействия, параметров излучения и оптической среды. Так, по результатам экспериментов [3] стекло К8 с диэлектрическим покрытием имеет лучевую прочность до 32 Дж/см^2 (длина волны — $1,054 \text{ мкм}$, длительность импульса излучения — 3 нс). Развитие технологий микроэлектроники привело к созданию микроэлектромеханических систем, элементами которых являются создаваемые в едином технологическом процессе микрзеркала, микроактюаторы, микролинзы, управляющие микросхемы и др. Одновременно формируются твердотельные источники излучения. Пленочные отражатели позволяют получить высокое быстродействие с временем переключения состояний до 20 нс [4]. Интегральная технология дает возможность создавать как одномерные, так и двумерные микросканеры.

В электрооптических и акустооптических дефлекторах (ЭОД, АОД) механические перемещения отсутствуют, что определяет их высокое быстродействие (угловые скорости отклонения пучка — в десятки тысяч рад/с) и, таким образом, существенное преимущество по сравнению с зеркальными сканаторами, но такие дефлекторы уступают им в угловых отклонениях и разрешении. Быстродействие ЭОД ограничено временем перезаряда емкости между управляющими электродами. Для управления ЭОД необходимо иметь высокие управляющие напряжения при значительной мощности устройства управления. Указанное обстоятельство приводит к нагреванию кристалла, дестабилизации дефлектора, уменьшению его разрешающей способности, ограничению реального быстродействия ЭОД. Погрешности отклонения пучков непрерывных электрооптических дефлекторов определяются точностью поддержания высоковольтного напряжения на управляющих электродах. Технические

характеристики ЭОД зависят от конструкции и типа электрооптического материала. Так, ЭОД на основе кристаллов танталат-ниобата калия (КТН) [5] в ближнем инфракрасном диапазоне имеют максимальный угол отклонения до 0,2 рад при напряжении 300 В, светопропускание — около 90 %, порог разрушения превышает 1 Дж/см² [6]. Область прозрачности — от 532 до 4000 нм. В КТН-кристаллах выявлена деформация формы пятна в зависимости от угла отклонения и плотности энергии лазерного излучения [7].

Физический предел увеличения апертуры АОД, необходимого для повышения разрешения, связан с временем установления акустической волны по всей апертуре светового пучка. Минимальный размер элемента разложения определяется дифракцией и зависит от ширины падающего пучка и длины световой волны. Возмущениями в работе АОД являются температурные градиенты вследствие выделения тепла в его элементах, что приводит к снижению разрешающей способности. Зависимость эффективности дифракции от акустической мощности дает возможность управлять энергией отклоняемого пучка. Погрешность отклонения пучка определяется точностными возможностями задающего частотного генератора. По данным [8], оптический диапазон пропускания разработанных АОД на основе парателлурита составляет 530–540; 630–850; 700–1100; 1064–1330 нм, оптическая апертура — до 20 мм, углы отклонения — до 60 мрад, эффективность дифракции — 70–85 %. Лучевая прочность кристалла — 200 МВт/см² (длина волны излучения — 1064 нм, длительность и частота импульсов — 12 нс и 1 Гц соответственно).

Матричные фотоприемники позволяют получить электронную развертку изображения и все изображение в целом, спектральную картину источников излучения. Основанные на общем физическом принципе преобразования световой энергии в электрический заряд приборы с зарядовой связью (ПЗС) и комплиментарные структуры «металл — оксид — полупроводник» (КМОП-структуры) выполняются с использованием различных принципов передачи информации и технологий изготовления, определяющих их технические возможности. Так, быстродействие широко распространенных ПЗС характеризуется частотами считывания в десятки мегагерц. Частота считывания информации в ПЗС ограничена скоростями работы регистров сдвига. Спектральный диапазон ПЗС определяется прохождением света через электроды и квантовой эффективностью применяемого материала. Чувствительность ПЗС на кремниевой подложке лежит приблизительно в диапазоне 0,4–1,1 мкм. Некоторые параметры ПЗС-сенсора Sony ICX 674 AQG: размер активной области — 8,8×6,6 мм, разрешение — 1940×1460 пикселей, размер пикселя — 4,54 мкм, динамический диапазон — 71 дБ, отношение «сигнал/шум» — 44 дБ, частота кадров — 57 кадров в секунду [9].

КМОП-структуры потребляют меньше энергии, имеют возможность произвольного доступа к любому элементу, имеют более высокую, чем ПЗС, частоту кадров, позволяют создание датчика изображения на основе одного кристалла [10]. Уменьшение размеров фоточувствительных элементов и, соответственно, разрешение связаны с возможностями технологии. Спектральный диапазон КМОП-структур на кремнии такой же, как у ПЗС. Так, КМОП-сенсор компании OmniVision OV2710-1E имеет параметры: оптический формат — 1/2.7'', разрешение — 1920×1080 px, размер пикселя — 3×3 мкм, частота кадров — 30 кадров в секунду. Сенсор имеет развитую функциональную структуру [11].

Для создания формирователей изображения в условиях плохой видимости, обнаружения скрытых объектов, ведения целеуказания активно разрабатываются и производятся инфракрасные болометрические фотоприемники, ведутся исследования перспективных материалов в части снижения размеров чувствительных элементов, стабильности и оптимальности характеристик, совместимости с КМОП-технологией. На основе оксида ванадия созданы матрицы форматом 2048×1536 px с размером пикселя 17 мкм (компания Raytheon, США). Преимущество таких матричных фотоприемников — возможность работы без охлаждения. Тепловая постоянная времени для микроболометров, разработанных на основе современных материалов и технологий, составляет величину порядка 10 мс [12].

Характеристики некоторых типов сканаторов, главным образом коммерческих, со взаимно дополняющими характеристиками приведены в табл. 1, составленной по материалам [5, 6, 13–18].

Таблица 1

Технология сканирования (тип сканатора)	ЭОД (КТН) [5]	АОД [6]	Гальванометры [13]	Зерк. барабаны [16]*	Пьезосканаторы [6]	MEMS DMD DLP4500 NIR (700–2500 нм) [14]
Апертура, мм	0,5–1,0	5–25	25–50	5×5 6×6 12,0×16,3 80×250	10–25	Матрица микрзеркал, диагональ 11,4
Максимальный угол отклонения, рад (разрешение в точках)	0,2 (50)	0,05 (500)	0,7	0,35–3,14 (1930, 3670, 4900, 7570)	0,01–0,1 (100–1000)	±0,2 (912×1140) (пиксель 7,6×7,6 мкм)
Временная характеристика	1 мкс	1 мкс	1–5 мс (0,1°)	11 000–81 000 об/мин	103 мкс	16 мкс
Светопропускание	~90 %	60–85 %	Более 99 % (9,3–10,6 мкм)	88 % (633 нм)	Более 95 %	96 %

* Данные по экспериментальным образцам типа «барабан – призма».

Характеристики ЭОД, АОД, DMD (Digital Mirror Device) указаны для ближнего инфракрасного диапазона излучения и дают представление о возможностях сканаторов в указанном диапазоне, используемых технологиях для применения в комбинированном сканировании. Помимо приведенных, существенны и другие характеристики, такие как точность, закон и линейность сканирования и др.

Анализ задач и технических решений комбинированного сканирования

При обработке изображений, представленных в виде фотографий, в ряде областей науки и техники возникают задачи поиска и проведения измерительных операций на выделенных объектах, оцифровки получаемой визуальной информации [19]. В измерительной установке Sweepnik¹ для обработки фотоснимков физического эксперимента использован лазерный луч. Сформированный лазерный пучок отклоняется по ортогональным осям координат кадра зеркалами с магнитоэлектрическим приводом. Требования к погрешности измерений по носителю изображения в 2 мкм определили необходимую дискретность измерения углового положения зеркал – около 0,1 угл. с. Для автоматического слежения по линиям и контурам в оптическую схему введен дополнительный сканатор на основе вращающейся призмы Дове с астигматической оптикой, формирующей микрорастр в виде сканирующего штриха, что отвечает специфике исследуемых объектов – треков ядерного взаимодействия. Устройство управления позволяет выполнять фильтрацию считанной информации, рассчитывать направление перемещения в режиме слежения. Задача управления заключается в формировании согласованных координатных воздействий зеркал для выполнения слежения и в пространственном перемещении микрорастра. Процесс управления сканированием и сбором данных осуществляется с помощью ЭВМ. Расширение функциональных возможностей

¹ Davies D.J.M., Frish O.R., Street G.S.B. Sweepnik: A Fast Semi-automatic Track Measurements Mashine. NIM. 1972. № 82. P. 54–60.

комбинированного сканирования в данной задаче сопровождается проблемой устойчивости слежения, которая зависит от качества снимка, степени его «зашумленности».

Техника телевидения и дисплеев предъявляет существенно разные требования к строчной и кадровой развертке. Сочетание скоростного строчного развертывающего устройства в виде зеркальной призмы или пирамиды и гальванометра для кадровой развертки позволяет достичь дисперсионной независимости отклоняемых пучков. Необходимое сочетание интенсивностей накладываемых пучков и, соответственно, цвета изображения достигается согласованной работой модуляторов. Характерным для оптической архитектуры устройств является пространственное разделение перед модуляцией излучений разных длин волн, создаваемых соответствующими лазерами, посредством дихроичных зеркал и оптических фильтров. Помимо высокой скорости строчной развертки для достижения высокой четкости требуются также ее стабильность, прямолинейность и параллельность строк. Для воспроизведения телевизионных изображений с использованием лазерного сканирующего устройства необходимо обеспечить синхронное со строчными синхроимпульсами перемещение лазерного пучка. Для этого требуются стабилизация механической развертки, применение в конструкции надежных прецизионных опор, работающих при высоких скоростях устройства развертки. Так, цветной лазерный дисплей [20], соответствующий стандарту HDTV 1920×1080, выполнен на основе 25-гранной зеркальной призмы строчной развертки (скорость вращения — 75 000 об/мин) и гальванометра кадровой развертки с частотой 30 кадров в секунду. В качестве опор использованы газовые подшипники. Угловая погрешность воспроизведения строки в направлении, перпендикулярном строчному движению, составляет 0,25 угл. с, погрешность системы стабилизации скорости — менее 5 PPM. Задачи управления сканато-рами и модуляцией излучения требуют применения соответствующего вычислительного устройства.

Развитие технологий управляемых микрозеркал привело к созданию новых схем составного сканирования и возможностей для развертывания изображений. Оптическая схема мобильного дисплея, описанного в [21], включает микрооптический модулятор SOM (Spatial Optical Modulator) дифракционного типа с микрозеркалами, приводимыми пьезоприфодом, отдельный одномерный зеркальный сканатор, лазерные источники излучения и проекционную оптику. Лазерные лучи источников красного, синего и зеленого излучения в устройстве модулируются для последовательного воспроизведения основных цветов в столбцах изображения, которые разворачиваются затем зеркальным сканатором горизонтальной развертки в изображение кадра. Качественное воспроизведение изображений требует высокого быстродействия микрозеркал. Одномерный массив микрозеркал с 480 рх (телевизионный стандарт VGA (640×480) с частотой 60 Гц) должен иметь частоту срабатывания около 150 кГц. Количество уровней для каждого цвета составляет 256. Благодаря быстродействию устройства высокое качество одномерного дисплея может быть достигнуто с меньшим количеством пикселей по сравнению с двумерными пространственными модуляторами. Управление подсистемами и дисплеем в целом выполняется контроллером.

Корректирующая функция строчного сканирования одновременно с задачей кадровой развертки реализована в комбинации зеркальной призмы строчной развертки с одномерным оптико-механическим сканатором с магнитоэлектрическим приводом кадровой развертки [22]. Устройство, предназначенное для прорисовки фотошаблонов, реализует в графопостроителе планшетного типа растровый принцип развертки лазерного пучка с высокой скоростью, а также позволяет осуществить коррекцию системных искажений, в том числе погрешностей, вызываемых пирамидальностью призмы. Для этого выполняется сканирование тестового образца, а вычисленные поправки служат затем, во время движения зеркала, управляющими воздействиями для сканатора кадровой развертки. Контроль и управление устройством выполняются с использованием двух отсчетных систем — для строчной развертки с использованием опорной решетки (цена отсчета — 12,5 мкм в плоскости носителя изображения)

и для кадровой развертки с использованием интерферометра (цена отсчета — 7,1 мкм). Электромеханический привод призмы снабжен системой стабилизации скорости вращения приводного двигателя. Замкнутая по углу сервосистема обеспечивает стабилизацию положения зеркала кадрового сканатора относительно задаваемого управляющей ЭВМ. Включение или выключение луча технологического лазера выполняется модулятором под управлением ЭВМ по координатам лазерного луча в соответствии с воспроизводимым рисунком. Необходимое качество прорисовки достигнуто за счет согласованной работы автономных систем управления. Описанное сканирующее устройство может быть использовано не только для воспроизведения графической информации, но и для считывания изображения с прозрачных носителей. В этом случае в фокальной плоскости оптической схемы вместо фотоматериала располагается носитель изображения. Оптическая схема дополняется располагаемыми за кадровым окном фокусирующей оптикой и фотоприемником, связанным с регистрами измерительных каналов. Режим считывания используется также графопостроителем для периодической калибровки графопостроителя.

Сочетание инерционных зеркальных сканаторов с более быстродействующими дефлекторами позволяет расширить функциональные возможности и повысить быстродействие интегрированного устройства. Составной сканатор для формирования «широкой строки» на плоском кадре на основе сочетания однозеркального двухкоординатного оптико-механического сканатора (ОЗС) исследован в работе [23]. Исследованная оптическая схема сканатора включала ОЗС и дополнительный магнитоэлектрический дефлектор. Отличительной особенностью ОЗС являются большие размеры зеркала (диаметр — около 100 мм), позволяющие работать с широкими пучками, фокусировать пучок на значительном расстоянии от выходной апертуры фокусирующей системы. Зеркало закреплено в кардановом подвесе и оснащено магнитоэлектрическим приводом. Контроль и управление ОЗС выполняются высокоточными автономными системами с интерференционными измерителями угловых перемещений (чувствительность ~0,1 угл. с в диапазоне до десятка угл. град.) [19]. Одномерный дополнительный магнитоэлектрический дефлектор осуществляет линейное микросканирование перпендикулярно основной строке. Высокоточные перемещения микрорастра по командам системы управления выполняет ОЗС. При этом повышаются требования к формирующей оптике. Оптическая схема должна учитывать возникающее смещение пучка по поверхности зеркала ОЗС, а также расфокусировку пятна на сканируемой поверхности. В состав оптической схемы для коррекции расфокусировки включена короткофокусная линза с электроприводом. Объектами системы управления являются, помимо ОЗС, дополнительного дефлектора, также модулятор и блок фокусировки. В результате комбинированное устройство приобрело функцию микросканирования и быстродействие, близкое к быстродействию дополнительного дефлектора.

Комбинированное сканирование лазерным пучком реализовано в устройстве формирования изображения полосы или полноформатного печатного листа, зарегистрированных на фото или термочувствительном материале, для потребностей полиграфии [24]. Оптико-механический дефлектор обеспечивает одномерный растр, модулированный по яркости. Акустооптический дефлектор осуществляет отклонение луча на высоту текстовой строки и тем самым обеспечивает прорисовку линий шрифтовых знаков. Двумерное изображение создается за счет равномерного перемещения светочувствительного или термочувствительного материала ортогонально к оси растра. Система управления выводного устройства выполняет в числе задач также синхронизацию положения лазерного луча с интенсивностью луча в заданной точке.

Сочетание сканаторов электромеханического и «электронного» привода является эффективным средством взаимного дополнения и расширения возможностей сканаторов в отношении различных режимов развертки в технологических приложениях. Так, в установке формирования импульсным лазером топологии рисунка многослойной печатной платы

[25, 26] использовано комбинированное векторное сканирование, которое выполняется гальванометрами совместно с акустооптическими дефлекторами. Дефлекторы регулируют мощность облучения, выполняют дополнительное отклонение луча для формирования элементов топологии и исправляют ошибки гальванометров на участках излома траектории. Описанная схема основана на динамике АОД, а также на превышении динамического диапазона АОД диапазона возможных ошибок гальванометра. В процессе сканирования, регулируя мощность излучения технологического лазера, можно в реальном времени изменять ширину, глубину и форму прокладываемых в печатной плате трасс. Предложенная архитектура позволила формировать в диэлектрике микронную топологию, достичь на рабочей поверхности предельных для гальванометра скоростей сканирующего элемента — более 2 м/с, снизить ограничения на радиус поворота при сохранении повторяемости. Исследования [5] различных вариантов решения задачи обработки материалов ультракороткими лазерными импульсами с использованием «электронных» дефлекторов также показали, что комбинация АОД или ЭОД с гальванометром имеет большие возможности в отношении точности и скорости обработки, чем в случае однотипных дефлекторов.

Особенностями оптических схем лазерных технологических сканирующих систем для микрообработки материалов являются необходимость высокой концентрации энергии в зоне обработки и локального регулирования параметров лазерного нагрева, а также обратное воздействие продуктов обработки на качество пучка. В технологических целях может сочетаться совмещение энергетического воздействия мощным излучением и процесса диагностики оптическим пучком малой мощности, выполняемого более быстрым дефлектором. Сложность, многофакторность и высокая скорость технологических процессов обуславливают необходимость высокоточных систем синхронизированного управления модуляцией, перемещением, формой и ориентацией сканирующего пятна.

Специфика дистанционного зондирования земной поверхности — значительная удаленность сканатора от объектов зондирования, рассеяние, поглощение электромагнитного излучения от исследуемых объектов при прохождении в атмосфере. В задачу сканирующего устройства телевизионного спектрорадиометра космического аппарата входит высокое пространственное разрешение (менее 1 м при съемках суши с высоты 400–700 км), его адаптация к полосе обзора, спектральный анализ в широком диапазоне (0,4–12,0 мкм) [27]. Условия эксплуатации сканирующего устройства обуславливают необходимость минимизации его массы, габаритов и повышения надежности. Решением для соответствия высоким требованиям к оптической системе и фотоприемнику в [27] стало использование комбинированной системы сканирования изображения, в которой сочетаются двухкоординатный зеркальный сканатор и матричный фотоприемник, выполняющий электронную развертку в плоскости изображения. Особенность конструкции сканатора — большие размеры сканирующего зеркала ($430 \times 80 \text{ мм}^2$), закрепленного в кардановом подвесе, приводимого электродвигателями-маховиками. Угловой диапазон сканирующего зеркала равен ± 15 угл. град., частота сканирования — около 1 Гц. Для получения качественного изображения предложена дополнительная система контроля положения визирной линии на основе позиционно-чувствительного элемента, использующая интерференционные измерители. Угловая чувствительность контроля положения сканирующего зеркала составляет величину менее 0,05 угл. с. Предельное разрешение оптико-электронной системы определяется разрешением объектива и размерами пикселя матричного фотоприемника.

Комбинация сканаторов нашла эффективное применение и в технике лазерной микроскопии. Так, в конфокальном лазерном сканирующем микроскопе выполняется процесс сканирования биологического образца в целях исследования потенциалов нейронов в живой ткани мозга, что требует высокого пространственного и временного разрешения [28]. Оптическая схема микроскопа включает двухкоординатный АОД и массив микрозеркал DMD. Искомая информация выделяется при сканировании АОД поверхности образца

последующим направлением линейкой микрозеркал флуоресцентного излучения зондируемых точек в детектор. При этом длина волны флуоресценции отлична от длины волны возбуждающего излучения. Следует отметить согласованность работы всей оптической системы, которая обеспечивается алгоритмом управления микрозеркалами и АОД. Управляющее устройство позволяет задавать для различных волн возбуждения положение луча на выходе АОД, которое наилучшим образом соответствует положению одного из микрозеркал массива. Выбранное микрозеркало во включенном состоянии направляет излучение образца в фотоприемник, в то время как остальные микрозеркала находятся в выключенном состоянии и отклоняют падающее излучение. Разработанная оптическая схема позволила достичь дисперсионной «развязки» сканаторов, пространственной фильтрации флуоресценции исследуемого образца, высокой световой эффективности, необходимых быстродействия и разрешения. В сравнении с конфокальной микроскопией, в которой селекция отраженных лучей образца выполняется с помощью точечной диафрагмы, в данной установке ее роль выполняет одно из микрозеркал матричной линейки.

Аналогичная по составу комбинация АОД и линейки микрозеркал предложена в устройстве считывания голографической памяти [29]. Одномерный АОД сканирует лазерным лучом линейку микрозеркал, которые открывают доступ к соответствующим ячейкам информации. Контроллер выполняет необходимые расчеты координат микрозеркал, работающих в колебательном режиме, выбор микрозеркал, на которые АОД направляет луч, и обеспечивает синхронизацию сканирующих устройств.

Оптическая когерентная томография (ОКТ) предоставила возможность получения оптических изображений внутренней микроструктуры в материалах и биологических образцах с высоким разрешением в режиме реального времени. В ОКТ по методу измерения во временной области сочетаются перемещение пучка по поверхности образца и дополнительное интерференционное сканирование (осевое сканирование). В качестве источника излучения используется широкополосный источник излучения. Отражающие или рассеивающие свойства образца фиксируются в виде соответствующих интерферограмм при определенных положениях колеблющегося референтного зеркала интерферометра. В одном из вариантов ОКТ по методу спектральной интерферометрии используется оптическая схема, включающая интерферометр с перестраиваемым по частоте источником излучения. Двумерное изображение поперечного сечения формируется путем перемещения оптического пучка по плоскости, по координате среза, с последовательной регистрацией фотоприемником получаемого в результате осевого сканирования интерференционного сигнала. Механическое изменение оптической разности хода в опорном канале отсутствует. Искомая амплитуда отраженного от неоднородностей микроструктуры излучения рассчитывается путем преобразования Фурье, примененного к интерферограмме. Результатом сканирования является двумерный массив данных, в котором каждый срез представляет интенсивность отраженного или рассеянного оптического светового пучка в зависимости от глубины исследуемого объекта. На основе таких массивов данных создаются объемные изображения. Механизм перестройки частоты источника излучения обеспечивает сканирование по глубине. Источники излучения с широким спектром и малой длиной когерентности дают возможность получить разрешение в осевом направлении порядка единиц мкм [30]. Высокая разрешающая способность ОКТ обуславливает необходимость обработки больших объемов информации, что требует от системы сканирования повышенного быстродействия. Весь процесс управления сканированием, сбором и обработкой данных производится с помощью компьютера.

При реализации ОКТ получают активное применение MEMS- и MOEMS-технологии, один из вариантов трехмерной оптической когерентной томографической системы на основе MEMS-зеркала описан в [31]. Микрозеркало размером 600×600 мкм выполняет сканирование поверхности образца, имеет резонансные частоты по двум координатам 3,5 и 8,0 кГц.

Источник излучения имеет центральную длину волны 1310 нм и ширину полосы 80 нм. В оптической схеме ОКТ использована высокоскоростная оптическая линия задержки. Разрешение по оси и поверхности сканирования — 10 и 20 мкм соответственно. Применение MEMS-технологии дает преимущество по компактности устройства и его цене.

Результаты анализа

Условия задачи и требования к сканирующему устройству ограничивают выбор сканаторов составного устройства. Практика применения комбинированного сканирования показывает, что рациональный выбор из имеющегося многообразия взаимно дополняющих сканаторов и их сочетание в оптической схеме позволяют обеспечить достижение желаемых характеристик сканирования реальных объектов, минимизировать по сложности аппаратные и алгоритмические решения.

Распространенным решением задачи по критерию «разрешение — быстродействие» является сочетание быстродействующего сканатора и более инерционного, но имеющего лучшее разрешение, что позволяет получить в составном устройстве выигрыш и в разрешении, и в быстродействии. В конфигурации электронного и электромеханического сканаторов появляется возможность быстро и в режиме реального времени компенсировать ошибку движения более инерционного электромеханического сканатора. Это может увеличить диапазон максимальных скоростей движения интегрированного устройства по сравнению с электромеханическими.

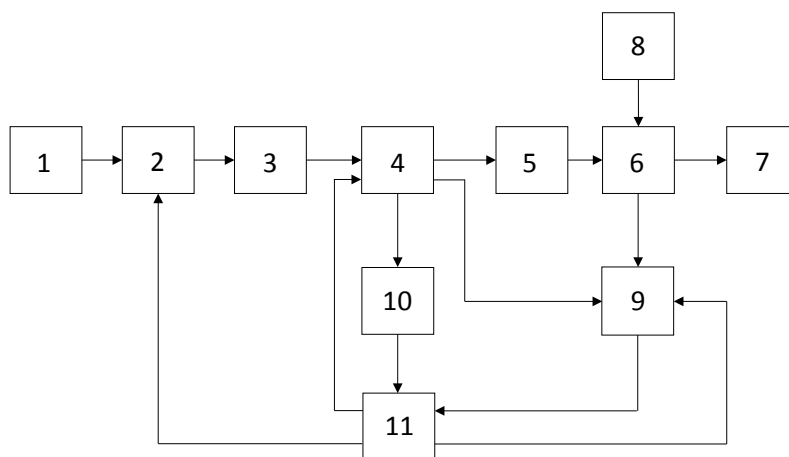
Сочетание двух режимов — сканирования исследуемого поля высокоточным сканатором с большим динамическим диапазоном и микросканирования более быстродействующим, с малым динамическим диапазоном, — является средством адаптации составного сканатора к обзорному полю, его объектам за счет изменения параметров микрозрака. Возможность адаптации облегчает обработку изображений, извлечение содержащейся в них информации, обнаружение и точную локализацию положения исследуемых объектов. Сочетание сканирующих устройств разного принципа действия может упростить пространственную фильтрацию излучения исследуемого поля, разделение излучений разных длин волн, снизить световые потери. Появление MEMS-, MOEMS-технологий расширило возможности комбинированного сканирования, позволило найти новые решения построения сканирующих систем. Современная вычислительная техника в составе комбинированных сканирующих устройств позволяет гибко учитывать особенности и реализовать возможности каждого сканатора, согласовывать и оптимизировать их совместное движение, выполнять контроль и управление рядом параметров. Наиболее распространенные сочетания взаимно дополняющих сканаторов: зеркальный барабан — гальванометр (зеркальный сканатор с магнитоэлектрическим приводом), АОД — гальванометр, АОД — микрозеркала, сканирующий интерферометр — микрозеркала и др.

Достижение преимуществ комбинированного использования сканаторов разных принципов влечет также и новые задачи и может привести дополнительные трудности. При создании составного устройства возникают задачи выбора составляющих составных сканаторов, разработки оптической схемы и устройства управления. Сочетание сканаторов порой требует разработки более сложной оптической схемы устройства и юстировки ее элементов. При объединении оптических пучков в схеме составного сканатора возникают вопросы пропускания и отражения излучений с разными длинами волн, лучевой прочности оптических элементов, световой эффективности. Приводы сканаторов разного принципа отличаются энергетическими требованиями, многорежимностью управления, а их совместное применение должно быть согласовано в динамическом, точностном и алгоритмическом отношении. Для выполнения измерительных операций, контроля и управления могут потребоваться различные измерительные и управляющие системы. Приведенные соображения сведены в табл. 2.

Таблица 2

Преимущества составного сканирования	Дополнительные задачи и трудности составного сканирования
Повышение качественных показателей; компенсация погрешностей и возмущений; адаптация к полю и объектам сканирования; гибкость режимов сканирования; расширение функций	Оптическое согласование; усложнение оптической схемы, ее юстировки, системы управления, привода с различными характеристиками; различные измерительные преобразователи

Несмотря на большое разнообразие сканирующих систем и по назначению, и по оптическим схемам, можно выделить общие элементы, входящие во многие системы. На основании анализа известных структурных решений, ориентируясь на распространенные задачи считывания и воспроизведения визуальной информации, можно предложить обобщенную функциональную схему комбинированной сканирующей системы (рисунок).



Обобщенная функциональная схема составного сканирования

1 – источник излучения; 2 – модулятор; 3, 5 – формирующая оптика;
 4 – блок сканаторов; 6 – объект сканирования; 7 – проекционный экран;
 8 – осветитель; 9 – устройство выделения сканируемой информации;
 10 – блок измерительных устройств; 11 – устройство управления и регистрации

Блок 4 включает сканаторы разных принципов, оптические элементы их сопряжения и фокусировки, формирует опорное излучение. Блок выделения сканируемой информации 9 предназначен для приема световых сигналов объекта сканирования, фильтрации, направления их на фотоприемники, оцифровки и передачи сигналов фотоприемников для дальнейшей обработки в устройство управления и регистрации 11. Измерительный канал позволяет контролировать перемещение пучка в пространстве, его положение, скорость, а также привязать выделяемую блоком 9 информацию к конкретным координатам объекта 6. Для формирования сканирующего пучка предусмотрены формирующие оптические элементы 3, 5. Для наблюдения оператором предусмотрен проекционный канал с выводом изображения на экран оператора 7. Управление всей системой сканирования, а также обработку и предоставление пользователю необходимой информации выполняет устройство управления и регистрации 11. Это устройство должно обеспечить синхронизированную работу сканаторов по координатам для заданного закона перемещения сканирующего пучка, на это же устрой-

ство могут возлагаться задачи управления источниками излучения и процессами модуляции. В устройстве объединяются результаты фотометрических, геометрических и спектральных измерений, выполняются синтез и анализ изображений. Для конкретных приложений отдельных блоков и связей приведенной схемы может и не быть, и напротив, могут быть дополнительные, специфические для них элементы.

Выводы

Комбинирование сканаторов со взаимно дополняющими характеристиками является эффективным методом решения задач считывания, преобразования и воспроизведения информации, улучшения характеристик составного устройства. Комбинированное сканирование позволяет интегрировать различные принципы сканирования, расширить границы качественных показателей сканирующих устройств, получить решение задач конкретных приложений более рациональным путем. Достижение преимуществ комбинированного использования сканаторов разных принципов влечет также и новые задачи. Сочетание сканаторов может потребовать разработки более сложной оптической схемы устройства, необходимости юстировки элементов, их оптического согласования. Усложняются задачи моделирования, структурные решения и алгоритмы автоматического управления составными сканаторами.

Статья подготовлена в рамках научно-исследовательской работы, проводимой ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ по государственному заданию № 075-01394-20-02 на 2020 г. Министерства образования и науки РФ в сфере экспертизы по проекту 730000Ф.99.1.БВ15АА00003.

Список литературы

1. Выскуб В.Г. Возможности и ограничения составных сканаторов // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 5. С. 74–82.
2. Любарский С.В., Химич Ю.П. Оптические зеркала из нетрадиционных материалов // Оптический журнал. 1994. № 1. С. 76–83.
3. Бабаянц Г.И., Гаранин С.Г., Жупанов В.Г. и др. Разработка и исследование диэлектрических покрытий с высокой лучевой прочностью // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 7. С. 663–666.
4. Bloom D.M. Grating Light Valve: revolutionizing display technology, Proc. of SPIE. Vol. 3013. Projection Displays III, 165 (May 8, 1997). P. 165–171.
5. Heberle J., Bechtold P., Straub J., Schmidt M. Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. Proc. of SPIE, 2016. Vol. 9736, P. 97360L-1-97360L-10.
6. Römer G., Bechtold P. Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. Physics Procedia, 2014. Vol. 56. P. 29–39.
7. Bechtold P., Bauer D., Schmidt M. Beam profile deformation of fs-laser pulses during electro-optic scanning with KTN crystals. Physics Procedia, 2012. Vol. 39, p. 683–692.
8. Сайт компании «Элент А». URL: <http://www.elent-a.net> (дата обращения: 27.08.2020)].
9. Сайт компании «Азимут Фотоникс». URL: http://azimp.ru/catalogue/ccd_cameras (дата обращения: 27.08.2020)].
10. Горбачев А.А., Коротаев В.В., Ярыгиев С.Н. Твердотельные матричные преобразователи и камеры на их основе. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 98 с.
11. Сайт OmniVision. URL: <https://www.ovt.com/image-sensors> (дата обращения: 27.08.2020)].
12. Кульчицкий Н., Наумов А., Старцев В. Рынок неохлаждаемых микроболометров для ИК-камер: тенденции и перспективы // Электроника: НТБ. 2019. № 1 (00182). С. 156–164.
13. Сайт Cambridge Technology. URL: <https://www.cambridgetechnology.com/products/galvanometer-scanner> (дата обращения: 27.08.2020)].
14. Сайт Cambridge Technology. URL: <https://www.cambridgetechnology.com/products/polygon-laser-scanner> (дата обращения: 27.08.2020)].
15. Сайт Cambridge Technology. URL: <https://www.cambridgetechnology.com/products/-laser-beam-components-specialty-products#polygon-mirrors> (дата обращения: 27.08.2020)].

16. Ребрин Ю.К., Сидоров В.И. Оптические дефлекторы. Киев: Техника, 1988. 135 с.
17. Norton Andrew et al. Preliminary characterization of Boston Micromachines 4096-actuator deformable mirror // SPIE 7209, MEMS Adaptive Optics III, 2009. P. 720901-1-720901-7.
18. Сайт Texas Instruments. URL: <http://www.ti.com/product/DLP4500NIR?qgpn=dlp4500nir> (дата обращения: 27.08.2020)].
19. Розов Б.С., Выскуб В.Г., Канцеров В.А. и др. Измерительные сканирующие приборы / под ред. Б.С. Розова. М.: Машиностроение, 1980. 198 с.
20. Mehrdad Ketabchi, Mikael Bering. Polygonal scanner subsystem for laser display. SPIE. Vol. 3131, 1997. P. 20–29.
21. Yun S.K., Song J.H., An S.D., et al. A novel diffractive micro-optical modulator for mobile display applications, Proc. of SPIE. 2008. Vol. 6887. P. 688702-1-688702-11.
22. Иванов А.А. Сканирующие системы для считывания и записи графической информации: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Протвино: ИФВЭ. 1992. 30 с.
23. Галуев С.В. Прецизионное управление оптическим пучком составными сканаторами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МИФИ. 1982. 17 с.
24. Самарин Ю.Н. Проектирование и расчет лазерных выводных устройств полиграфических машин. М.: Наука. 2004. 142 с.
25. Matsumoto H., Unrath M., Kleinert J., Zhang H. Laser direct ablation for patterning printed wiring boards using ultrafast lasers and high speed beam delivery architectures. CLEO: 2014, OSA, Technical digest (on line) (Optical society of America, 2014), paper ATu2L.4.
26. Unrath M., Jordens W., Ismail J., et al. Acousto-optic deflector applications in laser processing of dielectric or other materials. US patent 8,404,998 B2.
27. Медушев С.В., Ремизов В.Е., Шичков В.В. Перспективные варианты построения программируемого двухкоординатного привода сканирующего зеркала // Вопросы электромеханики. 2008. Т. 107. С. 32–37.
28. Bansal V., Patel S., Saggau P. High-speed confocal laser scanning microscopy using acousto-optic deflectors and a digital micromirror device. Proc. of SPIE, 2004. Vol. 5324. P. 47–54.
29. Kiefer R., Takakura Y., Fontaine J., et al. Association of acousto-optic and micro-scanning mirrors for diffractive memory high speed reading. SPIE, 2003. Vol. 4948. P. 236–242.
30. Гуров И.П. Оптическая когерентная томография: принципы, проблемы и перспективы // Проблемы когерентной и нелинейной оптики / под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова. СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2004. С. 6–30.
31. Woonggyu Jung, Daniel T. McCormick, Jun Zhang, et al. Optical coherence tomography based on high-speed scanning MEMS mirror. Proc. of SPIE. Vol. 5690, 2005. P. 342–348.

References

1. Vyskub V.G. (2018) *Vozmozhnosti i ogranicheniya sostavnykh skanatorov* [Possibilities and limitations of composite scanners] *Voprosy radioelektroniki* [Questions of radio electronics]. No. 5. P. 74–82.
2. Lyubarskiy S.V., Khimich Yu.P. (1994) *Opticheskie zerkala iz netraditsionnykh materialov* [Optical mirrors from unconventional materials] *Opticheskiy zhurnal* [Optical journal]. No. 1. P. 76–83.
3. Babayants G.I., Garanin S.G., Zhupanov V.G. et al. (2005) *Razrabotka i issledovanie dielektricheskikh pokrytiy s vysokoy luchevoj prochnost'yu* [Development and research of dielectric coatings with high beam strength] *Kvantovaya elektronika* [Quantum electronics]. T. 35. No. 7. P. 663–666.
4. Bloom D.M. (1997) Grating Light Valve: revolutionizing display technology. Proc. of SPIE. Vol. 3013. Projection Displays III, 165. May 8. P. 165–171.
5. Heberle J., Bechtold P., Straub J., Schmidt M. (2016) Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. Proc. of SPIE. Vol. 9736. P. 97360L-1-97360L-10.
6. Römer G., Bechtold P. (2014) Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. Physics Procedia, Vol. 56. P. 29–39.

7. Bechtold P., Bauer D., Schmidt M. (2012) Beam profile deformation of fs-laser pulses during electro-optical scanning with KTN crystals. *Physics Procedia*. Vol. 39. P. 683–692.
8. Sayt kompanii «Elent A» [Site of Elent a company]. Available at: <http://www.elent-a.net> (date of access: 27.08.2020).
9. Sayt kompanii «Azimut Fotoniks» [Site of the company «Azimut Photonics»]. Available at: http://azimp.ru/catalogue/ccd_cameras (date of access: 27.08.2020).
10. Gorbachev A.A., Korotaev V.V., Yarygiev S.N. (2013) *Tverdotel'nye matrichnye preobrazovateli i kamery na ikh osnove* [Solid-state matrix transducers and cameras based on them] *NIU ITMO* [NIU ITMO]. P. 98.
11. Sayt OmniVision [OmniVision website]. Available at: <https://www.ovt.com/image-sensors> (date of access: 27.08.2020).
12. Kulchitskiy N., Naumov A., Startsev V. (2019) *Rynok neokhlazhdaemykh mikrobolometrov dlya IK-kamer: tendentsii i perspektivy* [Market of uncooled microbolometers for IR cameras: trends and prospects] *Elektronika* [Electronics] NTB. No. 1 (00182). C. 156–164.
13. Sayt Cambridge Technology [Cambridge Technology website]. Available at: <https://www.cambridgetechnology.com/products/galva-nometer-scanner> (date accessed: 27.08.2020).
14. Sayt Cambridge Technology [Cambridge Technology website]. Available at: <https://www.cambridgetechnology.com/products/poly-gon-laser-scanner> (date accessed: 27.08.2020).
15. Sayt Cambridge Technology [Cambridge Technology website]. Available at: <https://www.cambridgetechnology.com/products/laser-beam-components-specialty-products#polygon-mirrors> (date accessed: 27.08.2020).
16. Rebrin Yu.K., Sidorov V.I. (1988) *Opticheskie deflektory* [Tekhnika Optical deflectors]. Technics. Kiev. P. 135.
17. Norton A. et al. (2009) Preliminary characterization of Boston Micromachines 4096-actuator deformable mirror. *SPIE 7209, MEMS Adaptive Optics III*. P. 720901-1-720901-7.
18. Sayt Texas Instrument [Texas Instruments website]. Available at: <http://www.ti.com/product/DLP4500NIR?qqpn=dlp4500nir> (date of access: 27.08.2020).
19. Rozov B.S., Vyskub V.G., Kantserov V.A., et al. (1980) *Izmeritel'nye skaniruyushchie pribory. Pod red. B.S. Rozova* [Measuring scanning devices. Ed. B.S. Rozova] *Mashinostroenie* [Mashinostroenie]. Moscow. P. 198.
20. Ketabchi M., Bering M. (1997) Polygonal scanner subsystem for laser display. *SPIE*. Vol. 3131. P. 20–29.
21. Yun S.K., Song J.H., An S.D., et al. (2008) A novel diffractive micro-optical modulator for mobile display applications, *Proc. of SPIE*. Vol. 6887. P. 688702-1-688702-11.
22. Ivanov A.A. (1992) *Skaniruyushchie sistemy dlya schityvaniya i zapisi graficheskoy informatsii: avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk* [Scanning systems for reading and writing graphic information: author. dis. Dr. Tech. sciences] *IFVE* [IHEP]. Protvino. P. 30.
23. Galuev S.V. (1982) *Pretsizionnoe upravlenie opticheskim puchkom sostavnymi skanatorami: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Precision control of an optical beam by composite scanners: Author. Thesis for Degree of Doctor of Engineering] *MIFI* [MIFI]. Moscow P. 17.
24. Samarin Yu.N. (2004) *Proektirovanie i racchet lazernykh vyvodnykh ustroystv poligraficheskikh mashin* [Design and calculation of laser output devices for printing machines] *Nauka* [Nauka]. Moscow. P. 142.
25. Matsumoto H., Unrath M., Kleinert J., Zhang H. (2014) Laser direct ablation for patterning printed wiring boards using ultrafast lasers and high speed beam delivery architectures. *CLEO: 2014, OSA, Technical digest* (on line) (Optical society of America). P. ATu2L.4.
26. Unrath M., Jordens W., Ismail J., et al. Acousto-optic deflector applications in laser processing of dielectric or other materials. US patent 8,404,998 B2.
27. Medushev S.V., Remizov V.E., Shichkov V.V. (2008) *Perspektivnye varianty postroeniya programmirovannogo dvukhkoordinatnogo privoda skaniruyushchego zerkala* [Promising options for constructing a programmable two-coordinate scanning mirror drive] *Voprosy elektromekhaniki* [Questions of electromechanics]. Vol. 107. P. 32–37.

28. Bansal V., Patel S., Saggau P. (2004) High-speed confocal laser scanning microscopy using acousto-optic deflectors and a digital micromirror device. Proc. of SPIE. Vol. 5324. P. 47–54.

29. Kiefer R., Takakura Y., Fontaine J., at all. (2003) Association of acousto-optic and micro-scanning mirrors for diffractive memory high speed reading. SPIE. Vol. 4948. P. 236–242.

30. Gurov I.P. (2004) *Opticheskaya kogerentnaya tomografiya: printsipy, problemy i perspektivy. Problemy kogerentnoy i nelineynoy optiki. Pod red. I.P. Gurova i S.A. Kozlova* [Optical coherence tomography: principles, problems and prospects. Problems of coherent and nonlinear optics. Ed. I.P. Gurov and S.A. Kozlova] *SPb GU ITMO* [SPb. GU ITMO]. P. 6–30.

31. Woonggyu Jung, Daniel T. McCormick, Jun Zhang, at all. (2005) Optical coherence tomography based on high-speed scanning MEMS mirror. Proc. of SPIE. Vol. 5690. P. 342–348.

DOI 10.35264/1996-2274-2020-2-139-144

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ АТОМНЫХ ЧАСОВ И СИСТЕМ ИХ СИНХРОНИЗАЦИИ

И.И. Рябцев, зав. лаб. Института физики полупроводников СО РАН, д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН, ryabtsev@isp.nsc.ru

С.П. Юркевичус, нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук, доц., jurkst@yandex.ru

А.Е. Гриценко, зам. нач. отдела ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук, gritsae@mail.ru

Рецензент: В.А. Жмудь

Изложены научно-технические проблемы и перспективы создания атомных часов и систем их синхронизации. Проведен краткий анализ состояния научных исследований в этой области за рубежом.

Ключевые слова: атомные часы, квантовые операции, технологии квантовой обработки информации.

SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL PROBLEMS OF CREATION OF ATOMIC CLOCK AND SYSTEMS OF THEIR SYNCHRONIZATION

I.I. Ryabtsev, Head of Lab., Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Ph. D., Corresponding Member of RAS, ryabtsev@isp.nsc.ru

S.P. Yurkevichyus, Head of Department, SRI FRCEC, Doctor of Engineering, Associate Professor, jurkst@yandex.ru

A.E. Gritsenko, Deputy Head of Department, SRI FRCEC, Doctor of Engineering, gritsae@mail.ru

Scientific and technological problems and prospects for the creation of atomic clocks and systems for their synchronization are stated. A brief analysis of the state of scientific research in this area abroad is carried out.

Keywords: atomic clocks, quantum operations, technologies of quantum information processing.

Введение

В настоящее время основными потребителями атомных стандартов частоты являются системы глобальной навигации, синхронизации и передачи данных. По мере развития квантовых технологий они могут также начать применяться, например, для синхронизации в квантовых линиях связи — как наземных оптоволоконных, так и спутниковых. Создание и совершенствование ультрастабильных лазеров, атомных решеток и ионных ловушек важно также для создания и увеличения точности прототипов квантового компьютера с кубитами на нейтральных атомах в оптических решетках и ионах в радиочастотных ловушках.

Анализ состояния научных исследований и степени их реализации

Атомные стандарты частоты основаны на привязке частоты оптического или СВЧ-генератора к частоте какого-либо достаточно узкого перехода между долгоживущими энергетическими состояниями атомов или ионов. В отличие от простых кварцевых, сапфировых

и других твердотельных эталонов частоты атомные эталоны не подвержены долговременному дрейфу частоты вследствие старения материала. Первичным эталоном частоты является СВЧ-переход между двумя компонентами сверхтонкой структуры основного состояния $6S$ атомов цезия-133 (^{133}Cs). Вторичным эталоном является аналогичный СВЧ-переход в атомах рубидия (Rb), а также СВЧ-переход между компонентами тонкой структуры первого возбужденного состояния атомов водорода (водородный мазер).

Ранее в первичном эталоне использовался тепловой пучок атомов цезия, пролетающий через две пространственно разнесенные области взаимодействия с СВЧ-полем. В результате двукратного взаимодействия в вероятности СВЧ-перехода возникают узкие резонансы Рамси, по которым осуществляется стабилизация частоты СВЧ-генератора. В схеме с тепловым пучком предельная точность была ограничена довольно коротким временем пролета атомов через СВЧ-резонаторы. Поэтому в современном Cs-стандарте применяется уже не тепловой пучок, а атомный фонтан лазерно-охлажденных атомов, имеющих гораздо меньшую скорость движения и большое время взаимодействия с СВЧ-полем [1]. Предельная абсолютная погрешность такого стандарта составляет около 10^{-15} за время измерения порядка 10^3 секунд.

Дальнейшее увеличение точности атомных СВЧ-стандартов частоты не представляется возможным из-за чрезмерно большого времени измерения. Уменьшение этого времени возможно за счет перехода от СВЧ-резонансов в атомах к оптическим резонансам. Оптическая частота таких резонансов составляет 10^{14} – 10^{15} Гц, поэтому точности измерения на уровне 10^{-15} можно достичь за время ~ 1 с. При времени измерения $\sim 10^3$ с точность может составить уже 10^{-17} – 10^{-18} . Для ее достижения необходимо работать только с лазерно-охлажденными атомами для исключения влияния доплеровского и времяпролетного уширений. Поэтому во всем мире в настоящее время ведутся интенсивные экспериментальные и теоретические исследования по созданию оптических стандартов частоты на основе холодных атомов и ионов.

Для атомов применяются оптические решетки, в которых захват атомов осуществляется в максимумы или минимумы интенсивности стоячей световой волны благодаря градиентной дипольной силе [2]. Число атомов в решетке составляет несколько тысяч, что обеспечивает быстрое измерение сигнала и высокое отношение «сигнал/шум». Для ионов применяются радиочастотные ловушки, способные захватывать и длительно удерживать одиночные ионы [3]. Сигналы от одиночных ионов гораздо слабее, чем от атомов в оптических решетках, однако одиночные ионы имеют преимущество отсутствия столкновительного уширения. Поэтому исследования ведутся как с ансамблями атомов в решетках, так и с одиночными ионами. В обоих случаях в качестве реперного оптического резонанса выбираются сильнозапрещенные интеркомбинационные переходы с шириной линии менее 1 Гц. Такие переходы имеются, например, в атомах магния (Mg), стронция (Sr), иттербия (Yb), ртути (Hg) и в ионах ртути (Hg^+), алюминия (Al^+), бериллия (Be^+).

Еще одно актуальное направление создания атомных стандартов частоты – миниатюрные атомные стандарты, предназначенные для замены кварцевых эталонов в мобильных устройствах [4]. Предельная точность кварцевого эталона составляет 10^{-9} (без термостатации), в то время как миниатюрный стандарт способен обеспечить 10^{-11} – 10^{-12} . В миниатюрном стандарте громоздкие компоненты заменены миниатюрными или исключены вообще. Например, в миниатюрном рубидиевом стандарте резонансная лампа заменена лазером с вертикальным резонатором (ЛВР), поглощающая ячейка с атомами рубидия имеет размеры ~ 1 мм вместо нескольких см, а громоздкий СВЧ-резонатор исключен. Вместо резонатора применяется СВЧ-модуляция ЛВР на частоте, равной половине частоты сверхтонкого расщепления основного состояния атомов рубидия-87. При СВЧ-модуляции в спектре лазера появляются боковые частоты, которые создают L-схему переходов и приводят к эффекту когерентного пленения населенностей.

В результате при сканировании частоты генератора образуется узкий резонанс (50–100 Гц), который используется для стабилизации частоты СВЧ-генератора.

Развитие направления совершенствования атомных и оптических стандартов частоты за рубежом

За рубежом имеется большое число научных групп, занимающихся созданием и совершенствованием атомных и оптических стандартов частоты. Наибольшие успехи достигнуты следующими группами (таблица «Статусы создания атомных оптических стандартов частоты»):

- D. Wineland, NIST, USA, одиночные ионы Hg^+ (статус Э7), Al^+ (статус Э8);
- C. Oates, NIST, USA, оптическая решетка с атомами Yb (статус Э8);
- J. Ye, JILA, USA, оптическая решетка с атомами Sr (статус Э8);
- E. Peik, PTB, Germany, одиночный ион Yb^+ (статус Э7);
- F. Riehle, PTB, Germany, оптическая решетка с атомами Sr (статус Э7);
- H. Katori, RIKEN, Japan, оптические решетки с атомами Yb (статус Э7), Sr (статус Э8), Hg (статус Э7);
- A. Madej, NRC, Canada, одиночный ион Sr^+ (статус Э8);
- S. Bize, SYRTE, France, оптические решетки с атомами Sr (статус Э6) и Hg (в разработке);
- P. Jill, NPL, UK, одиночный ион Yb^+ (статус Э7);
- компания Microsemi, USA, миниатюрный стандарт с атомами Rb (статус М2).

Статусы создания атомных оптических стандартов частоты

Код	Параметр	Стабильность атомных часов за 100 с								
	№ стадии	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Статус	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}	10^{-13}	10^{-14}	10^{-15}	10^{-16}	10^{-17}	10^{-18}
Э	– первичных эталонов	Э1	Э2	Э3	Э4	Э5	Э6	Э7	Э8	Э9
П	– стационарных/перевозимых часов	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	П9
М	– мобильных микрочасов	М1	М2	М3	М4	М5	М6	М7	М8	М9

Перечень достижений по стадиям развития оптических стандартов частоты нового поколения в мире

Создание оптических стандартов частоты нового поколения стало возможным благодаря развитию технологий лазерного охлаждения, оптических решеток, фемтосекундных оптических гребенок и квантовой информатики. Поскольку оптические стандарты основаны на оптических, а не СВЧ-переходах, их основной проблемой является прямое измерение оптических частот, для чего применяется фемтосекундная оптическая гребенка [5]. До ее создания в 2000 г. применялись сложные системы переноса частоты на основе смещения оптических, терагерцовых и СВЧ-частот. В настоящее время эта проблема решена, поэтому оптические стандарты начали интенсивно развиваться во всем мире. Двумя основными системами являются одиночные ионы в радиочастотных ловушках [6] и атомы в оптических решетках [7]. Наиболее передовые исследования в этом направлении выполняются в Национальном институте стандартов и технологий США (NIST).

В 2006 г. в NIST было впервые продемонстрировано, что оптические часы на основе атомов в оптических решетках не уступают в точности первичному СВЧ-стандарту на основе фонтана атомов цезия. В экспериментах 2013 г. было показано, что двое Sr-часов, содержащих по 10^4 атомов стронция, оставались синхронными друг относительно друга с точностью $1,5 \times 10^{-16}$. В том же году аналогичный эксперимент в NIST с решетками атомов иттербия продемонстрировал стабильность $1,6 \times 10^{-18}$. Дальнейшее исследование вкладов всех возможных паразитных эффектов и систематических погрешностей позволило в 2014 г. увеличить абсолютную точность до уровня 10^{-18} [8].

Одиночные ионы в радиочастотных ловушках позволяют, в принципе, достичь аналогичной точности [9]. В начале 2000-х гг. в качестве основного кандидата рассматривался ион $^{199}\text{Hg}^+$. Однако в 2008 г. в NIST было продемонстрировано, что ион алюминия обеспечивает более высокую точность за счет возможности применения элементов квантовой логики в комбинированной ионной ловушке с ионами алюминия и бериллия, где ион бериллия используется для неразрушающего измерения квантового состояния иона алюминия. В 2010 г. еще лучшие результаты были получены при замене иона бериллия ионом магния [10].

В 2000-х гг. в NIST выполнялись также исследования по созданию миниатюрных атомных часов на основе микроячеек с атомами рубидия и цезия. Исследования финансировались Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), которое сформулировало основные требования к таким часам: объем — менее 1 см^3 , потребляемая мощность — менее 30 мВт, относительная нестабильность — менее 10^{-11} за 1 ч. Исследования велись несколькими научными группами. Прототип первых миниатюрных часов был продемонстрирован в 2004 г. [11]. Какой-либо информации о достижении заданных параметров опубликовано не было. Однако в результате этих исследований была создана компания Symmetricom, которая коммерциализировала разработки. Начиная с 2011 г. она предлагает в открытой продаже миниатюрные атомные стандарты со следующими параметрами: объем — менее 17 см^3 , потребляемая мощность — менее 120 мВт, относительная нестабильность — менее 10^{-11} за 1 ч. В настоящее время эта компания поглощена компанией Microsemi, где предположительно продолжают работы по совершенствованию миниатюрных атомных часов.

Недавно, 23.08.2019, состоялся экспериментальный запуск атомных часов для дальнего космоса (DSAC), разработанных в Лаборатории реактивного движения NASA. Они представляют собой миниатюрные сверхточные часы на основе иона Hg^+ .

Преимущества и недостатки оптических стандартов частоты нового поколения

Дальнейшее повышение точности современных атомных СВЧ-стандартов частоты не представляется возможным из-за необходимости чрезмерно большого времени измерения. Уменьшение этого времени возможно за счет перехода от СВЧ-резонансов в атомах к оптическим резонансам. Оптическая частота таких резонансов составляет 10^{14} – 10^{15} Гц, поэтому точности измерения на уровне 10^{-15} можно достичь за время ~ 1 с. При времени измерения $\sim 10^3$ секунды точность может составить уже 10^{-17} – 10^{-18} . Для ее достижения необходимо работать только с лазерно-охлажденными атомами для исключения влияния доплеровского и времяпролетного уширений. Поэтому во всем мире в настоящее время ведутся интенсивные экспериментальные и теоретические исследования по созданию оптических стандартов частоты на основе холодных атомов и ионов.

Миниатюрные атомные стандарты предназначены для замены кварцевых эталонов в мобильных устройствах. Предельная точность кварцевого эталона составляет 10^{-9} , в то время как миниатюрный стандарт способен обеспечить 10^{-11} – 10^{-12} . Это может существенно повысить точность мобильных навигационных устройств, систем синхронизации и передачи данных.

К недостаткам оптических стандартов частоты на основе холодных атомов и ионов следует отнести большую техническую сложность их реализации. Для их создания применяются вакуумная камера, специальные ловушки для атомов и ионов и прецизионные лазеры с шириной линии ~ 1 Гц, требующие специальных дорогостоящих и громоздких систем стабилизации частоты на основе высокостабильных вакуумированных оптических интерферометров. Кроме того, каждому оптическому стандарту частоты присущи систематические погрешности: сдвиг резонанса под действием окружающего теплового излучения, столкновительные сдвиги из-за взаимодействия атомов в оптических решетках, сдвиги из-за присутствия паразитных электромагнитных полей, световой сдвиг в оптических решетках, остаточное доплеровское уширение и т. д. Вклад каждой из этих погрешностей в общую погрешность стандарта частоты должен тщательно измеряться, рассчитываться и учитываться.

Также при улучшении точности таких стандартов ниже 10^{-18} могут обнаружиться еще не известные источники дополнительных погрешностей, которые потребуют интенсивных теоретических и экспериментальных исследований.

В миниатюрных атомных стандартах частоты до сих пор остается не решенной проблема достижения параметров, заданных DARPA. В настоящее время миниатюрные стандарты не могут полноценно заменить кварцевые эталоны частоты из-за слишком больших массы и габаритов. Необходимо проводить дальнейшую работу по их совершенствованию.

Перспективы развития оптических стандартов частоты

В ближайшие пять лет предполагается значительно улучшить параметры оптических стандартов частоты для достижения абсолютной точности и погрешности на уровне 10^{-18} (и лучше). Рассматривается вопрос о переопределении первичного стандарта частоты, поскольку лучшие первичные стандарты на основе фонтана холодных атомов Cs обеспечивают предельную точность не выше 10^{-16} . Предполагается постепенная замена СВЧ-стандартов оптическими стандартами – как в метрологических службах, так и в разнообразных применениях атомных стандартов: глобальной навигации, синхронизации и передаче данных. СВЧ-стандарты будут заменяться также на спутниковых системах глобальной навигации. Такие работы планируются как в России, так и за рубежом. Например, в области миниатюрных атомных часов продолжатся работы по их дальнейшему совершенствованию и миниатюризации для достижения требований DARPA и постепенному внедрению в мобильные навигационные и другие устройства.

В ближайшие десять лет будут проводиться работы по дальнейшему повышению точности оптических атомных часов вплоть до уровня 10^{-20} . Для этого будут проводиться исследования по поиску подходящих атомных реперов с наименьшими систематическими погрешностями. Например, в качестве перспективных вариантов рассматриваются оптические магнитодипольные переходы в многозарядных ионах [12] и ядерные переходы в ядре атома тория [13].

Заключение

Для реализации планов развития оптических стандартов частоты в ближайшие 5–10 лет потребуются дальнейшее совершенствование высокостабильных источников лазерного излучения, так как ширина линии лазера не должна превышать ширину реперного резонанса для обеспечения максимально возможной точности. Это потребует значительных технических усилий по реализации ультрастабильных лазеров и поиску новых методов их стабилизации, а также по дальнейшему совершенствованию фемтосекундных оптических гребенок. Также необходимо найти новые перспективные атомы и ионы с уменьшенными систематическими сдвигами и уширениями реперных линий. Сами линии должны обладать шириной на уровне миллигерц. Для уменьшения наиболее неопределенного теплового сдвига будущие оптические стандарты должны использовать криогенные камеры.

Список литературы (References)

1. Bizeet S. et al. (2005) Journal of Physics. Is. 38. P. 449.
2. Derevianko A. et al. (2011) Reviews of Modern Physics. Is. 83. P. 331.
3. Wineland D.J. (2013) Reviews of Modern Physics. Is. 85. P. 1103.
4. Gerginov V. et al. (2005) Proceedings of the 2005 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition. Vancouver, Canada. P. 758.
5. Hänsch Th.W. (2006) Journal of Physics. Is. 78. P. 1297.
6. Wineland D.J. (2013) Journal of Physics. Is. 85. P. 1103.
7. Derevianko A. et al. (2011) Journal of Physics. Is. 83. P. 331.
8. Bloom B.J. et al. (2002) Nature. Vol. 506. P. 71.

9. Oskay W.H. et al. (2006) Physical Review Letters. Is. 97. P. 801.
10. Chou C.W. et al. (2010) Physical Review Letters. Is. 104.
11. Gerginov V. et al. (2005) Proceedings of the 2005 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition. Vancouver, Canada. P. 758.
12. Yudin V.I. et al. (2014) Physical Review Letters. Is. 113.
13. Herrera-Sancho O.A. et al. (2013) Physical Review. A. 88.

DOI 10.35264/1996-2274-2020-2-145-159

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ВТОРИЧНОГО ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

В.Д. Ключев, глав. науч. сотр. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, д-р экон. наук, проф., действ. чл. Академии военных наук, kluev@extech.ru

Ю.А. Бирюков, докторант Военного инженерно-технического института Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева, канд. техн. наук, uabiryukov@mail.ru

В.В. Панаева, нач. упр., ФАУ РосдорНИИ, канд. экон. наук, vicvic913@yandex.ru

Рецензент: В.И. Курдюмов

В статье рассматривается проблема использования ресурсосберегающих технологий переработки отходов строительных материалов для обеспечения экологической безопасности и вторичного использования материалов при демонтаже (сносе) зданий. Даны обоснования в развитии и адаптации теории применения ресурсосберегающих технологий при организации демонтажа (сноса) зданий.

Ключевые слова: демонтаж (снос) зданий, ресурсосберегающие технологии, переработка отходов строительных материалов, вторичное использование материалов, экологическая безопасность.

RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES FOR PROCESSING WASTE OF BUILDING MATERIALS TO ENSURE ENVIRONMENTAL SAFETY AND THEIR SECONDARY USE

V.D. Klyuev, Chief Researcher, SRI FRCEC, Ph. D., Professor, Full Member of Academy of Military Sciences, kluev@extech.ru

Yu.A. Biryukov, Doctoral Student, Military Institute (Engineering and Technological) of the Military Academy of Material and Technical Support named after General of the Army A.V. Khrulev, Doctor of Engineering, uabiryukov@mail.ru

V.V. Panayetova, Director of Department, FAU RosdorNII, Doctor of Economics, vicvic913@yandex.ru

The article deals with the problem of using resource-saving technologies for processing construction materials waste to ensure environmental safety and reuse of materials during the dismantling (demolition) of buildings. Justification is given for the development and adaptation of the theory of using resource-saving technologies in the organization of dismantling (demolition) of buildings.

Keywords: dismantling (demolition) of buildings, resource-saving technologies, recycling of construction materials, recycling of materials, environmental safety.

Введение

В обнародованной Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года (далее — Стратегия) в качестве предполагаемых рисков, препятствующих достижению ключевых показателей Стратегии,

указаны в том числе риски, связанные с недостаточным ресурсным обеспечением, включая объемы производства строительных материалов. В связи с этим достаточно остро встают вопросы переработки отходов строительных материалов, получаемых при демонтаже (сносе) зданий и сооружений и их повторном использовании, что в определенной степени снизит предполагаемые риски.

На основе проведенного анализа выявлено, что сегодня перерабатывается всего лишь 12–20 % отходов строительных материалов, что составляет 16–21 % от общего объема всех отходов в нашей стране [1–4, 16, 19, 22]. При больших разрушениях, и особенно на огромных площадях, закономерно возникает проблема решения вопросов переработки значительных объемов строительных отходов в целях получения из них материалов вторичного использования.

Переработка и повторное применение отходов каменной кладки

Известны различные способы переработки и повторного применения отходов от разборки, и особенно каменной кладки. Такой материал применим при укладке оснований временных дорог, площадок, автостоянок и других второстепенных дорожных покрытий. Бой кирпича может использоваться для подсыпки покрытия временных грунтовых дорог на стройплощадках и в садоводствах. Кирпичный бой позволяет быстро заполнить выбоины и ямы, временно устранить повреждения дорожного покрытия до проведения текущего ремонта. Важную роль играет такой материал и при проведении строительных работ нулевого цикла, так как используется для подсыпки под строительство, особенно на слабых и болотистых почвах, для предотвращения просадок строений [12–15, 17, 20].

Материалы от разборки каменной кладки успешно применяли и для нового строительства несущих и ограждающих конструкций. Так, при разборке кирпичной кладки из растворов М25 и ниже в первую очередь из завалов стен выбирали целый кирпич и половняк, очищая его от раствора. Такой кирпич легко очищается и может быть использован при кладке забутки стен наравне с новым кирпичом.

Кирпич и половняк, полученные от разборки кладки на прочном растворе, плохо поддаются очистке, вследствие чего такой кирпич использовали в качестве заполнителя в бетоне и бутобетоне для кладки фундаментов и отдельных массивов, а вторичный щебень — в бетоне для устройства межбалочного бетонного заполнения перекрытий и подготовок под полы. На таком заполнителе получают бетоны с пределом прочности от 10 до 15 МПа и плотностью 1800–2000 кг/м³, т. е. на 20 % легче, чем на обычных тяжелых заполнителях.

Кирпичный бой использовался в качестве отсыпки оснований под временные дороги и обочины. Мелкий кирпичный бой, не отсеянный от мусора, а также строительный мусор применялись в качестве засыпок в стенах облегченных кладок. Строительный мусор, получаемый после отсева щебня, применялся как утеплитель чердачных перекрытий, а также взамен песка в растворах и бетонах. Кирпичная крошка является хорошим тепло- и шумоизолятором, если частично заполнить ею стены.

Во время и после Великой Отечественной войны при восстановлении разрушенных городов использовалась цемянка, представляющая собой тонкомолотый кирпичный порошок, имеющий зерна, сравнимые по размеру с зернами цемента. Цемянка применялась в смеси с цементом или известью для приготовления растворов и бетонов. Добавление цемянки в цементные растворы и бетоны давало экономию цемента, а в известковых растворах на воздушной извести цемянка играла роль гидравлической добавки [5–8].

Для изготовления цемянки может применяться кирпич с остатками раствора или без него. Наличие старого раствора желательно, так как старый раствор сохраняет некоторую активность. Цемянка, полученная из кирпича без примеси вяжущего, не обладает свойствами вяжущего. При добавлении цемянки к цементу до 25–30 % активность этой смеси не уменьшается по сравнению с активностью чистого цемента, а в некоторых случаях даже и повышается. При увеличении доли цемянки (более 30 %) активность смеси заметно падает.

Сроки твердения цементно-цемяночного вяжущего несколько удлиняются по сравнению с твердением цемента без добавок. Удлинение сроков схватывания происходит обратно пропорционально изменению активности. Нарастание прочности цементно-цемяночного вяжущего в первое время происходит медленнее, чем нарастание прочности цемента, а в дальнейшем превышает его по скорости (в пределах 2 мес.).

В смеси с воздушной известью цемянка образует вяжущее, отличное от известкового, и приобретает свойства гидравлического вяжущего. Скорость нарастания прочности смеси извести с цемянкой и окончательная прочность значительно выше, чем те же показатели у известковых растворов с другими заполнителями. Достаточно сказать, что в лабораторных условиях удавалось добиваться прочности известково-цемяночных растворов $R_{28} = 25$ МПа, а в среднем прочность колебалась от 10 до 14 МПа. При этом наибольшую прочность давали растворы, по составу близкие к следующему: цемянка + песок (мелкий кирпичный бой с зернами 1,0–0,15 мм) + извести пушонки 6–10 % (от суммарного веса первых двух составных частей). При уменьшении количества извести в пределах до 2,5 % прочность падала на 20–25 %. При дальнейшем уменьшении количества извести прочность падала. Очень большое влияние на прочность цемяночного раствора оказывает количество воды: при его увеличении на 10 % прочность падает на 20–30 %. Уменьшение количества воды ниже 10 % трудно осуществимо вследствие того, что раствор становится неудобоукладываемым. Исходя из этого оптимальное количество воды принималось равным 15 %. В этом случае прочность известково-цемяночного раствора составляла от 5 до 9 МПа.

Процесс приготовления цемянки состоит из предварительного раздробления в щебенку каменных глыб, получаемых от разборки зданий, и последующего помола щебня при помощи специализированных дробильных машин. Сырье – кирпичная кладка, раздробленная на месте разборки на блоки крупностью до 40 см, – подается транспортером на камнедробилку. Камнедробилка может быть применена любая (конусная, молотковая, щековая), с выходным отверстием, отрегулированным на выпуск фракций не крупнее 20–30 мм. Камнедробилку желательно устанавливать на 1,5–2,0 м выше уровня земли, с тем чтобы выходящий из нее кирпичный щебень попадал непосредственно в помольную машину. В качестве помольной машины применимы шаровые мельницы, бегуны или дезинтеграторы. Продолжительность помола устанавливается в зависимости от применяемого типа машин и колеблется в пределах от 15 до 18 мин. После указанного времени, потребного для помола, дальнейшего увеличения тонкости помола не происходит. Это обстоятельство и служит критерием, определяющим время для помола [11].

В результате помола и просеивания по фракциям получается продукт с содержанием 40–55 % фракций крупностью цемента и 65–45 % фракций крупностью в пределах 1,0–0,15 мм. Вследствие очень небольшой собственной активности цемянки влажность ее во время хранения не играет практически никакой роли. Но работать на производстве значительно удобнее с сухой цемянкой, а поэтому при хранении ее нужно защищать от намокания.

Однако существующие способы применения отходов каменной кладки для возведения новых стен не в полной мере соответствуют современным требованиям по обеспечению теплоэффективности ограждающих конструкций, что не позволяет комплексно использовать отходы в новом строительстве.

Исходя из этого предлагается использование материалов от разборки каменной кладки для приготовления кладочного раствора и пенобетонного заполнителя для облегченной кладки стен малоэтажных зданий.

Для приготовления кладочного цементно-известкового раствора и пенобетона используется цемянка с содержанием фракций крупностью цемента и мелкий заполнитель из каменной крошки с содержанием фракций крупностью в пределах 1,0–0,15 мм.

Решая вопрос об использовании стеновых материалов для переработки их на цемянку, целесообразно на месте производимой разборки здания установить дробилку, чтобы с

территории разборки вывозить готовую продукцию — цемянку. Ориентировочные расходы вяжущего на 1 м³ песка и на 1 м³ раствора приведены в табл. 1, где $R_B = M_B/1000$.

Таблица 1

Ориентировочные расходы вяжущего на 1 м³ песка и на 1 м³ раствора

Вяжущие	Марка раствора M_p	Марка вяжущего M_B	Показатель $R_B Q_B$	Расход вяжущего, кг	
				На 1 м ³ песка	На 1 м ³ раствора
Вяжущие по: ГОСТ 10178–85; ГОСТ 25328–82; ГОСТ 22266–2013	150	500	140	280	330
		400		350	400
		300		470	510
	100	500	102	205	250
		400		255	300
		300		340	390
	75	500	81	160	195
		400		200	240
		300		270	310
		200		405	445
	50 25	400	56	140	175
		300		185	225
		200		280	325
		300	31	105	135

Приготовление цемяночного цементно-известкового раствора может производиться как на растворобетонном узле, так и в отдельно стоящем на строительной площадке растворосмесителе принудительного действия.

Для получения заданной марки раствора в случае применения вяжущих, отличающихся маркой $M_{вф}$ от приведенных в табл. 2, расход вяжущего на 1 м³ мелкого заполнителя определяют по формуле:

$$Q_{вф} = \frac{R_B Q_B}{M_{вф}} 1000,$$

где Q_B — расход вяжущего на 1 м³ мелкого заполнителя, кг; $Q_{вф}$ — расход вяжущего с иной активностью; $R_B Q_B$ — принимается для данной марки раствора.

Расход для смешанных цементно-известковых растворов и мелкого заполнителя приведен в рыхлонасыпанном состоянии при естественной влажности 3–7 %.

Количество известкового теста V_d на 1 м³ мелкого заполнителя определяется по формуле:

$$V_d = 0,17(1 - 0,002 Q_B),$$

где V_d — неорганическая добавка на 1 м³ мелкого заполнителя, м³.

При применении цементно-известковых растворов для надземных конструкций при относительной влажности воздуха помещений свыше 60 % отношение объема известкового теста к насыпному объему цемента составляет не более 1:1.

Таблица 2

Прочность демяночного цементно-известкового раствора

Возраст, сут.	Прочность раствора, %, при температуре твердения, °С						
	1	5	10	20	30	40	50
1	1	4	6	13	23	32	43
2	3	8	12	23	38	54	76
3	5	11	18	33	49	66	85
7	15	25	37	55	72	87	100
14	31	45	60	80	92	100	—
21	42	58	74	92	100	—	—
28	52	68	83	100	—	—	—

Пропорция объемных частей раствора ($V_B:V_D:1$) составляется на основании данных о расходе вяжущего и известкового теста после деления составляющих:

$$\frac{V_B}{V_B} : \frac{V_D}{V_B} : \frac{1}{V_B},$$

где V_B — расход вяжущего на 1 м³ мелкого заполнителя, м³.

Расход вяжущего на 1 м³ песка V_B определяют по формуле:

$$V_B = \frac{Q_B}{\gamma},$$

где γ — насыпная плотность вяжущего, кг/м³.

Дозировку извести в качестве неорганической добавки по объему осуществляют в виде теста плотностью 1400 кг/м³ (при применении извести I сорта количество теста уменьшается на 10 %).

Расход воды на 1 м³ мелкого заполнителя для получения растворной смеси заданной подвижности зависит от состава раствора, вида вяжущего и заполнителя и устанавливается на опытных замесах. Для цементно-известковых растворов подвижностью 9–10 см расход воды на 1 м³ песка может быть определен по формуле:

$$B = 0,5 (Q_B + Q_D),$$

где B — расход воды на 1 м³ песка, кг; Q_D — расход известкового теста на 1 м³ песка, кг.

Составы цементно-известковых растворов приведены в табл. 3, а в табл. 4 приведены расходы цемента и цементной пыли, которую допускается вводить в состав растворов.

Приготовление растворных смесей выполняется на растворобетонном узле (РБУ) или в отдельно стоящих растворосмесителях на строительной площадке. При приготовлении растворных смесей следует обеспечить обязательные условия:

- дозировка составных частей раствора производится по массе и корректируется при изменении вида, плотности и активности вяжущего, влажности и плотности заполнителя, вида пластифицирующих добавок;
- подвижность раствора должна отвечать заданной величине;
- необходимо тщательное перемешивание составляющих.

Таблица 3

Составы цементно-известково-цемяночных растворов для надземных конструкций при относительной влажности воздуха помещений до 60 %

Марка раствора	Составы в объемной дозировке растворов при марке вяжущего				
	500	400	300	200	150
150	1:0,3:4	1:0,2:3	1:0,1:2,5	—	—
100	1:0,5:5, 5	1:0,4:4,5	1:0,2:3,5	—	—
75	1:0,8:7	1:0,5:5,5	1:0,3:4	1:0,1:2,5	—
50	—	1:0,9:8	1:0,6:6	1:0,3:4	—
25	—	—	1:1,4:10,5	1:0,8:7	1:0,3:4

Таблица 4

Расход цемента и цемянки

Марка раствора	Марка вяжущего	Расход цемента и цемянки, кг, на 1 м ³ мелкого заполнителя с влажностью 3–7 % кгс/см ²	
		Цемент	Цемянка
150	400	345	90
	300	465	50
100	400	250	105
	300	335	85
75	400	195	100
	300	260	85
50	200	395	45
	400	130	135
	300	175	110
25	200	270	85
	300	95	140
	200	140	125

Данные по подбору состава пенобетона приведены в табл. 5.

Таблица 5

Характеристики пенобетона на цемяночном растворе

Наименование показателя	Значение показателя						
Плотность пенобетона в сухом состоянии, кг/см ²	400	600	800	1000	1200	1400	1600
Мелкий заполнитель (до 2 мм)	—	270	400	560	750	950	1100
Цемент марки М400 50 %, цемянка 50 %	320	270	320	350	360	380	400
Вода для приготовления раствора, л	112	97	120	140	151	167	184
Вода для приготовления пены, л	17	21	19	17	14	11	9
Количество пены, л	805	715	630	560	460	370	290
Количество пенообразователя, кг	0,9	0,8	0,76	0,68	0,56	0,45	0,36
Вес сырой пенобетонной массы, кг	450	659	860	1068	1276	1509	1693
Водоцементное соотношение исходного раствора	0,35	0,36	0,37	0,4	0,42	0,44	0,46

Погрешность дозирования материалов, составляющих растворную смесь, не должна превышать: 1 % — при дозировании вяжущих, воды и добавок; 2 % — при дозировании песка.

При приготовлении растворов с микропенообразователями вначале перемешивают пластификатор с водой в течение 30–45 с, затем загружают остальные материалы. Перемешивание всех указанных растворов продолжается до получения однородной массы, но не менее 1 мин. Контроль качества растворов производится в соответствии с ГОСТ 5802–86 «Растворы строительные. Методы испытаний» и состоит из определения следующих основных показателей:

- подвижности растворной смеси;
- расслаиваемости растворной смеси;
- водоудерживающей способности растворной смеси;
- плотности растворной смеси и затвердевшего раствора;
- предела прочности на сжатие (марки) раствора;
- морозостойкости раствора.

Подвижность растворной смеси определяется для каждого состава раствора, а также при всяком изменении качества материалов: вида вяжущего, крупности и влажности песка, вида добавок и т. п. При одном и том же качестве материалов подвижность растворной смеси определяется не менее 1 раза в смену. Расслаиваемость растворной смеси определяется в тех случаях, когда ее хранение или транспортирование (автомобилями, вагонетками и другими транспортными средствами) может вызвать расслоение и нарушение однородности.

Водоудерживающая способность растворной смеси определяется в целях установления состава раствора, обеспечивающего получение расчетной прочности (марки) раствора в условиях отсоса из него воды кирпичом или камнем.

Переработка органических и минеральных материалов

Большой проблемой является комплексная переработка органических и минеральных материалов, образующихся от сноса зданий и сооружений.

К материалам и оборудованию, которые могут быть использованы после восстановления, относятся: элементы встроенной мебели, паркет, дверные полотна, контрольно-измерительные приборы систем инженерного оборудования (водомеры, газовые и электрические счетчики, датчики автоматической пожарной сигнализации и др.), домофоны, элементы систем инженерного оборудования (газовые и электрические плиты, газовые водонагреватели, распределительные щиты с предохранителями и рубильниками, кабельные коробки, коммутаторы и др.), а также фаянсовые, эмалированные и скобяные изделия, изделия из цветных металлов, запорная и регулирующая арматура. Приборы и оборудование, не требующие восстановления, должны быть подвергнуты специализированными службами профилактическому ремонту, включающему проверку, чистку и регулировку, в целях приведения их в соответствие действующим техническим условиям.

К вторичному сырью, которое подлежит утилизации при сносе строений, относятся: макулатура (бумага, картон, текстиль, упаковка), стеклобой, черный и цветной металлолом, битум и асфальт, пластмассы (полиэтилен-терефталат, поливинилхлорид, полиэтилен высокого и низкого давления, пластики, полистирол), резина, древесина [9, 10, 24–27].

Материалы от разборки могут быть повторно использованы по следующим направлениям:

- демонтированные металлические и деревянные конструкции следует подвергнуть резке по габаритным размерам в целях дальнейшего применения;
- находящиеся в хорошем состоянии теплоизоляционные материалы, аккуратно демонтированные фрагменты коммуникационных сетей (водопроводные, электрические, газовые, канализационные, телефонные), запорная арматура и т. п. после сортировки и проверки могут быть повторно использованы;
- регистрирующие приборы, нагревательное оборудование (чугунные и металлические радиаторы) и т. д., находящиеся в рабочем состоянии, после их демонтажа, профилактических работ и повторной сертификации могут использоваться по назначению;

— повторно могут быть использованы непосредственно конструкции и отделочные элементы, бывшие в употреблении: каменные наружные ступени, каменные облицовочные плиты цоколя и наружных стен, облицовка полов, лестниц, стеклопакеты, алюминиевые переплеты окон, деревянные и металлические коробки окон и дверей, дверные блоки, чугунные кованые ограждения и т. д.

Отходы сноса и демонтажа строительных конструкций зданий и (или) сооружений, непригодные для вторичного использования, имеющие допустимый уровень содержания опасных и вредных веществ, должны использоваться для засыпки отработанных карьеров и иных неудобных территорий. Места хранения отходов должны быть утверждены и включены в перечень территорий для размещения отходов строительства и сноса и расположены в непосредственной близости от населенных пунктов.

Технологический процесс переработки металлолома

При сносе металлических и железобетонных конструкций зданий и сооружений, демонтаже инженерного и технологического оборудования образуется лом черных и (в значительно меньших количествах) цветных металлов. Технологический процесс переработки металлолома включает его сбор, сортировку, раздельное складирование лома цветных и черных металлов, переплавку на специализированных предприятиях.

Сбор, сортировку и складирование металлолома выполняют с помощью средств механизации, применяемых при сносе объектов. При этом выполняют резку и раскрой металлолома, измельчение и дробление железобетонных конструкций с сепарацией арматуры.

Ежегодно с использованием лома черных металлов в мире выплавляется каждая третья тонна стали. Переработка такого лома при плавке металла обеспечивает снижение затрат производства на материал шихтового типа, энергоресурсы и многое другое. Так, технология литья стали предполагает достаточно большой объем металлолома для смешивания его с чугуном. При этом чем больше лома использовано при выплавке, тем более высокого качества будет сталь. При этом переработка лома черных металлов гораздо экологичнее, дешевле и экономически выгоднее, чем добыча нового металла. Для переработки требуется меньше топлива и производственных мощностей, чем для добычи металла и производства новых сплавов.

Переработка прочих материалов

Отходы материалов на бумажной основе (картон, обои, упаковочная бумага) могут использоваться для производства теплоизоляционных смесей, кровельных материалов типа «Ондулин», «Эковата».

Отходы штукатурного раствора могут применяться в качестве порошковых наполнителей при производстве стеновых блоков, смесей монолитного литья.

Отходы на основе минеральных вяжущих (гипсокартон, известково-песчаные, известково-шлаковые смеси и др.) рекомендуются как заполнители при изготовлении стеновых блоков.

Древесные материалы (поврежденные конструкции, столярные изделия, тара, фанера, древесно-стружечные плиты и т. д.) могут перерабатываться в измельчителях в стружку, опилки, щепу и использоваться в качестве сырья для производства древесностружечных и древесноволокнистых плит, арболита, теплоизоляционных и звукоизоляционных плит или для получения тепловой энергии.

Все виды старой древесины перерабатывают, как правило, в два этапа. Вначале производят предварительное измельчение до фракции 120–400 мм. Для доизмельчения и получения топливной щепы применяют вторичные измельчители роторного типа.

Для утилизации древесины разработана технология, позволяющая перерабатывать предварительно измельченные древесные отходы в синтетический или генераторный газ — смесь СО и Н₂ — с теплотворной способностью 1200 ккал, который является альтернативой природному газу, мазуту и углю в паровых котлах, дизельному топливу в дизель-генераторах на специальной установке.

Модуль установки мощностью 1 МВтэ располагается в габаритах четырех 12-метровых контейнеров и перерабатывает 1 т отходов в час.

Отходы древесины могут подвергаться и химической обработке. Существуют следующие виды химической обработки древесины: термическая, экстракционная, гидролизная переработка древесины, производство целлюлозы и продуктов из нее. При производстве бумаги на первом этапе путем измельчения древесных отходов и целлюлозы подготавливают древесно-бумажную массу в водной среде, затем вводят добавки: наполнители, проклейку, красители. На заключительном этапе на непрерывно движущейся сетке отливают бумажную массу, обезвоживают, прессуют, сушат и сматывают в рулон. Процесс изготовления — непрерывный.

Не подлежит повторному использованию и переработке древесина, пораженная домовыми грибами и жуками-точильщиками, — ее необходимо сжигать на специальных площадках.

Переработка пластиковых отходов

Важным направлением является переработка пластиковых отходов ввиду увеличения их удельного веса в общем объеме. Насчитывается около 150 видов пластиков, при этом 30 % от этого — смеси различных полимеров. Такие отходы загрязняют окружающую среду. Пластик относится к материалам, которые практически не разлагаются со временем, а при его сжигании выделяются крайне токсичные вещества, которые невозможно вывести из организма. В настоящее время проблема переработки отходов полимерных материалов получает актуальность не только в связи с охраной окружающей среды, но и по причине дефицита полимерного сырья. Из 1 кг отходов (полиэтилентерефталат (ПЭТФ), полипропилен (ПП), полиэтилен высокого давления (ПВД), полиэтилен низкого давления (ПНД)) получается 0,8 кг вторичного сырья [21].

Известно несколько способов переработки пластика: механический и химические, к последним следует отнести пиролиз, гидролиз, гликолиз, метанолиз. Самым распространенным химическим способом переработки пластика является метанолиз — расщепление отходов с помощью метанола.

Однако в настоящее время наиболее приемлемым методом переработки остается механический рециклинг — вторичная переработка, так как этот способ не требует дорогого специального оборудования и может быть реализован в любом месте накопления отходов.

Процесс переработки пластиковых отходов включает три основных этапа: дробление, агломерацию и грануляцию.

Переработку отходов пластика начинают с их сортировки. Вначале отходы пластика сортируют по цвету и видам пластмасс. Далее отходы подвергают дроблению на ножевой дробилке. Полученную крошку промывают водой или раствором каустической соды и высушивают при температуре 130 °С. Очень важно правильно высушить пластмассу: от этого напрямую зависит качество вторичного сырья. Следующий этап — агломерация. Крошка спекается в небольшие комочки. Заключительный этап переработки — грануляция. Материал в процессе грануляции уплотняется и становится более удобным для дальнейшей переработки.

Оборудование для переработки пластиковых отходов представляет собой широкий спектр разных агрегатов, которые используются для утилизации отходов разного типа, это и дробилки для пластика, и прессы для пластика. Станки по переработке пластика и пластмассы подразделяются на разные виды в зависимости от того, для каких отходов они предназначены.

Вторичный пластик используется для листа, пленки, бандажной ленты, упаковки. Из пластиковых отходов и минеральных наполнителей (золы, песка) может производиться полимербетон, имеющий разнообразное применение.

Для ускорения и упрощения переработки полимерных отходов от демонтажа (сноса) зданий авторами разработана мобильная установка переработки полимерных отходов, которая подтверждена патентом на полезную модель № 195999 «Мобильный комплекс переработки полимерных отходов» [18] и представлена на рис. 1 и 2.

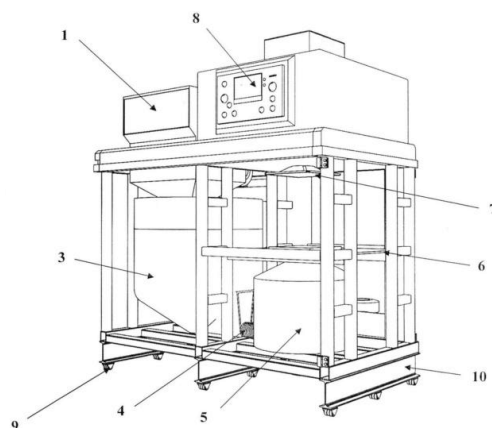


Рис. 1. Фронтальный вид мобильного комплекса переработки полимерных отходов

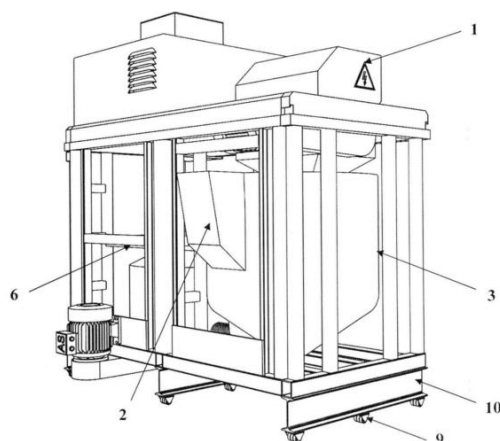


Рис. 2. Вид задней части мобильного комплекса переработки полимерных отходов

Данная мобильная система может быть использована для переработки полимерных отходов от демонтажа (сноса) зданий при их больших объемах и для производства композитного штучного строительного материала при значительном удалении от стационарных перерабатывающих комплексов в закрытых и отдаленных регионах страны.

В основе разработки мобильного комплекса лежит задача создания компактной мобильной системы переработки полимерных отходов с возможностью доставки любым видом транспорта, а также способной свободно перемещаться, и с возможностью ее установки на неподготовленные площадки за счет оборудования рамы установки регулирующими по высоте роликами.

Отличительные признаки установки – наличие соединительной нагревательной трубки, измельчителя полимерных отходов, экструдера, подающего нагретую смесь на формовочную площадку, а также регулируемых по высоте роликов, установленных на раму установки. При этом в установке отсутствуют ленточный конвейер и модуль подачи поддонов, что снижает потребность в площади для размещения установки.

Мобильный комплекс перерабатывающей системы содержит измельчитель полимерных отходов (1), бункер-дозатор (2) для засыпания абразивных материалов, емкость для их перемешивания (3), соединительную нагревательную трубку, нагревающую полученную смесь (4), экструдер (5), подающий нагретую смесь на формовочную площадку (6), вибропресс для формования изделий (7), оснащенный панелью управления (8), регулируемые по высоте ролики (9), установленные на раме установки (10).

Функционирует перерабатывающая система следующим образом: полимерные отходы помещаются в измельчитель, абразивные материалы засыпаются в бункер-дозатор, откуда поступают в емкость для перемешивания с измельченными полимерными отходами. Затем через соединительную нагревательную трубку они поступают в экструдер, подающий нагретую смесь на формовочную площадку, где смесь формируется с помощью вибропресса, оснащенного панелью управления. После чего с помощью регулируемых по высоте роликов система может быть установлена на любую поверхность и способна свободно перемещаться.

В целях расширения возможностей транспортирования мобильного комплекса переработки полимерных отходов в виде блок-контейнера для его перемещения применяется любой грузовой транспорт, включая мусоровозы с системой «мультилифт», что представлено на рис. 3.

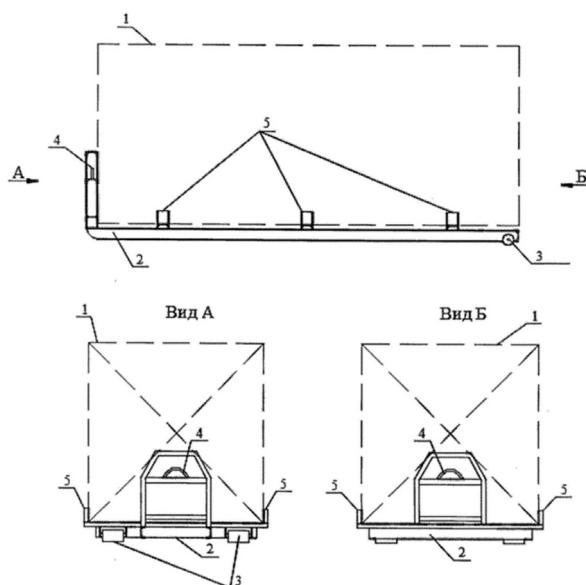


Рис. 3. Устройство для транспортировки блок-контейнера:

1 – жилой блок-контейнер, 2 – опорная рама, 3 – задние опорные катки, 4 – проушина, 5 – габаритные ограничители-крепления

Новизна разработки подтверждается патентом на полезную модель № 189398 «Устройство для транспортировки блок-контейнера» [23].

Существующая конструкция рамы основания блок-контейнера дополнена опорными катками и проушинами, что позволяет использовать штатную технику и существенно повышает мобильность блок-контейнеров, обеспечивая надежность крепления блок-модуля при транспортировке за счет использования креплений-ограничителей.

Вывод

На наш взгляд, предлагаемые ресурсосберегающие технологии и оборудование для их осуществления повысят эффективность использования бюджетных ассигнований, выделяемых на строительство зданий и сооружений, за счет переработки строительных отходов,

получаемых при разборке (демонтаже) объектов, и их повторном использовании, что в определенной степени снизит возможный дефицит материальных ресурсов и повысит экологическую безопасность.

Статья подготовлена в рамках научно-исследовательской работы, проводимой ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ по государственному заданию № 075-01394-20-02 на 2020 г. Министерства образования и науки РФ в сфере экспертизы по проекту 730000Ф.99.1.БВ15АА00003.

Список литературы

1. Акри Е.П., Пташинский Д.Г. Современные методы утилизации и переработки строительного мусора // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 60 (1). С. 76–78.
2. Башева Т.С., Шейх А.А., Гаркушина М.П. Анализ и оценка существующих методов обращения со строительными отходами // Инновации в строительстве. 2017. С. 37–43. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32688630> (дата обращения: 07.08.2020).
3. Бирюков А.Н., Денисов В.Н., Бирюков Ю.А. Восстановление объектов военной инфраструктуры при ликвидации последствий вооруженных конфликтов: моногр. СПб.: ВИ(ИТ) ВА МТО, 2019. 338 с.
4. Бирюков А.Н., Денисов В.Н., Бирюков Ю.А. Снос зданий и сооружений в современных условиях: моногр. СПб.: ВА МТО. 2014. 256 с.
5. Бирюков А.Н. Концепция восстановления и строительства объектов при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций в системе обеспечения экономической безопасности страны // Вестник гражданских инженеров: науч.-техн. журнал. 2012. № 4 (33). С. 123–129.
6. Бирюков А.Н. Механизм предпочтения концепции восстановления и строительства объектов // Вестник Моск. ун-та им. С.Ю. Витте: эл. науч. журнал. Сер. 1. Экономика и управление. 2012. № 2. С. 26–32.
7. Бирюков А.Н. Военно-экономический механизм выбора концепции восстановления и строительства объектов при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций // Современные проблемы науки и образования: эл. журнал. 2012. № 1.
8. Бирюков А.Н., Бирюков Ю.А. Основные организационно-технологические решения и экономическая целесообразность сноса зданий // Вестник гражданских инженеров: науч.-техн. журнал. 2012. № 5 (34). С. 103–109.
9. Бирюков А.Н., Добрышкин Е.О., Кравченко И.Н. Планирование восстановления объектов жилищного фонда на основе вариантного проектирования // Системные технологии. 2019. № 1 (30). С. 63–70. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=40460323> (дата обращения: 07.08.2020).
10. Бирюков А.Н., Добрышкин Е.О. Совершенствование логистики процесса поставок материальных ресурсов автомобильным транспортом на объекты военно-строительного комплекса // Военный инженер. 2019. № 1 (11). С. 13–20. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37037730> (дата обращения: 07.08.2020).
11. Веснеболоцкий К.И., Маслобоев Д.С. Утилизация отходов. СПб.: Изд-во Балт. гос. техн. ун-та, 2012. 92 с.
12. Губанов Л.Н., Зверева В.И., Зверева А.Ю. Переработка, утилизация и рациональное использование строительных отходов // Приволжский научный журнал. 2013. № 2 (26). С. 94–98. URL: <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/95660/#1> (дата обращения: 07.08.2020).
13. Костецкий Н.Ф., Лунев Г.Г. Организационно-технологические проблемы использования вторичных строительных ресурсов при реконструкции объектов недвижимости // Экономика строительства. 2005. № 4. С. 2–12.
14. Кравцова М.В., Васильев А.В., Кравцов А.В., Носарев Н.С. Анализ методов утилизации отходов строительства с последующим вовлечением их во вторичный оборот // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2015. Т. 17. № 4 (4). С. 804–809. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27035395> (дата обращения: 07.08.2020).

15. Кравченко И.Н., Бирюков А.Н., Тростин В.П., Федоров А.О. Модернизация технологического оборудования по обогащению местных строительных материалов и утилизации разрушенных конструкций // Строительные и дорожные машины. 2019. № 12. С. 44–51.

16. Лунев Г.Г. Анализ экономической эффективности цикла переработки вторичных строительных ресурсов // Вестник ЮРГТУ (НПИ). 2014. № 1. С. 127–137. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21830640> (дата обращения: 07.08.2020).

17. Маругин В.М., Азгальдов Г.Г., Белов О.Е., Бирюков А.Н. Квалиметрическая экспертиза строительных объектов. СПб.: Политехника, 2008. 527 с.

18. Мобильный комплекс переработки полимерных отходов: пат. 195999 Российская Федерация: МПК В29В 17/00, В29В 11/10, В29В 13/02 / М.Ю. Гляков, Р.О. Гольцин, Ю.А. Бирюков, А.Н. Бирюков, М.С. Шкиря; Санкт-Петербург. Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева. № 2019117343; заявл. 04.06.19; опубл. 12.02.20. Бюл. № 5. 3 с.

19. Олейник С.П. Единая система переработки строительных отходов // СвР-АРГУС. 2006. 336 с.

20. Прохоцкий Ю.М., Лунев Г.Г. Организационные и экономические проблемы использования вторичных строительных ресурсов при реконструкции объектов недвижимости // Инноватика и экспертиза. 2010. Вып. 1 (4). С. 81–94. URL: http://inno-exp.ru/archive/04/innov_4_2010_81-94.pdf (дата обращения: 07.08.2020).

21. Сkochихина Т.В. Динамика переработки строительных отходов, образующихся на территории Санкт-Петербурга // Науч. журнал НИУ ИТМО. Сер.: Экономика и экологический менеджмент. 2015. № 1. С. 228–238. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23216645> (дата обращения: 07.08.2020).

22. Стальная М.И. Технологическая переработка отходов пластмасс в строительный материал // Актуальные проблемы развития науки и образования. М., 2014. С. 141–143.

23. Устройство для транспортировки блок-контейнера: пат. 189398 Российская Федерация: МПК В60Р 3/36 / Янович К.В., Лунев А.С., Бирюков Ю.А., Бирюков А.Н.; Санкт-Петербург. Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А. В. Хрулева. № 2018142334; заявл. 29.11.18; опубл. 21.05.19. Бюл. № 15. 3 с.

24. Bolotin S., Birjukov A. Time Management in Drafting Probability Schedules for Construction Work // World Applied Sciences Journal. 2013. № 13. P. 1–4.

25. Biryukov A.N., Bulanov A.I., Ivanovsky V.S., et al. // Basics of organization, economy and management in construction. M.: Spetsstroy Russia Publishing, 2012. P. 319–322.

26. Biryukov A., Bolotin S. Construction of temporary accommodation camp and selection of optimal type of building // Periodical «Applied Mechanics and Materials». 2015. Vol. 725–726. P. 105–110; 2015. Trans Tech Publications, Switzerland / Online available since 2015/Jan/29 at www.scientific.net, ISSN 2304-6295, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.105 (accessed: 07.08.2020).

27. Dobryshkin E.O., Birjukov A.N., Birjukov Yu.A., Tishchenko V.A. Complex approach to organizations' capital assets reproduction. E3S Web of Conferences 157, 04026 (2020) KTTI-2019. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015704026> (accessed: 07.08.2020).

References

1. Akri E.P., Ptashinsky D.G. (2020) *Sovremennyye metody utilizatsii i pererabotki stroitel'nogo musora* [Modern methods of utilization and processing of construction waste] *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the development of science and education] No. 60 (1). P. 76–78.

2. Basheva T.S., Sheikh A.A., Garkushina M.P. (2017) *Analiz i otsenka sushchestvuyushchikh metodov obrashcheniya so stroitel'nymi otkhodami* [Analysis and assessment of existing methods of handling construction waste] *Innovatsii v stroitel'stve* [Innovations in construction]. P. 37–43. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32688630> (date of access: 07.08.2020).

3. Biryukov A.N., Denisov V.N., Biryukov Yu.A. (2019) *Vosstanovlenie ob"ektov voennoy infrastruktury pri likvidatsii posledstviy vooruzhennykh konfliktov: monogr.* [Restoration of objects of military infrastructure in the elimination of the consequences of armed conflicts: monograph.] *VI(IT) VA MTO* [VI (IT) VA MTO]. St. Petersburg. P. 338.

4. Biryukov AN, Denisov VN, Biryukov Yu.A. (2014) *Snos zdaniy i sooruzheniy v sovremennykh usloviyakh: monogr.* [Demolition of buildings and structures in modern conditions: monograph.] *VA MTO* [VA MTO]. St. Petersburg. P. 256.
5. Biryukov A.N. (2012) *Kontseptsiya vosstanovleniya i stroitel'stva ob"ektov pri likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy v sisteme obespecheniya ekonomicheskoy bezopasnosti strany* [The concept of restoration and construction of facilities during the elimination of the consequences of emergency situations in the system of ensuring the country's economic security] *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov: nauch.-tekhn. zhurnal* [Bulletin of civil engineers: scientific and technological Journal]. No. 4 (33). P. 123–129.
6. Biryukov A.N. (2012) *Mekhanizm predpochteniya kontseptsii vosstanovleniya i stroitel'stva ob"ektov* [The mechanism of preference for the concept of restoration and construction of objects] *Vestnik Mosk. un-ta im. S.Yu. Vitte: el. nauch. zhurnal. Ser. 1. Ekonomika i upravlenie* [Bulletin of Moscow State University named after S.Yu. Witte: email scientific. Journal. Ser. 1. Economics and Management]. No. 2. P. 26–32.
7. Biryukov A.N. (2012) *Voenno-ekonomicheskii mekhanizm vybora kontseptsii vosstanovleniya i stroitel'stva ob"ektov pri likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy* [Military-economic mechanism for choosing the concept of restoration and construction of facilities in the elimination of the consequences of emergency situations] *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya: el. zhurnal* [Modern problems of science and education: el. Journal]. No. 1.
8. Biryukov A.N., Biryukov Yu.A. (2012) *Osnovnye organizatsionno-tekhnologicheskie resheniya i ekonomicheskaya tselesoobraznost' snosa zdaniy* [Basic organizational and technological solutions and economic feasibility of demolishing buildings] *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov: nauch.-tekhn. zhurnal* [Bulletin of civil engineers: scientific and technological Journal]. No. 5 (34). P. 103–109.
9. Biryukov A.N., Dobryshkin E.O., Kravchenko I.N. (2019) *Planirovanie vosstanovleniya ob"ektov zhilishchnogo fonda na osnove variantnogo proektirovaniya* [Planning for the restoration of housing facilities on the basis of variant design] *Sistemnye tekhnologii* [System technologies]. No. 1 (30). P. 63–70. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=40460323> (date of access: 07.08.2020).
10. Biryukov A.N., Dobryshkin E.O. (2019) *Sovershenstvovanie logistiki protsessa postavok material'nykh resursov avtomobil'nyim trans-portom na ob"ekty voenno-stroitel'nogo kompleksa* [Improving the logistics of the process of supplying material resources by road transport to the facilities of the military-construction complex] *Voennyi inzhener* [Military engineer]. No. 1 (11). P. 13–20. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37037730> (date of access: 07.08.2020).
11. Vesnebolotsky K.I., Masloboev D.S. (2012) *Utilizatsiya otkhodov* [Recycling] *Izd-vo Balt. gos. tekhn. un-ta* [Publishing house Balt. state tech. University]. St. Petersburg. P. 92.
12. Gubanov L.N., Zvereva V.I., Zvereva A.Yu. (2013) *Pererabotka, utilizatsiya i ratsional'noe ispol'zovanie stroitel'nykh otkhodov* [Recycling, disposal and rational use of construction waste] *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [Privolzhsky scientific journal]. No. 2 (26). S. 94–98. Available at: <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/95660/#1> (date of access: 07.08.2020).
13. Kostetsky N.F., Lunev G.G. (2005) *Organizatsionno-tekhnologicheskie problemy ispol'zovaniya vtorichnykh stroitel'nykh resursov pri rekonstruktsii ob"ektov nedvizhimosti* [Organizational and technological problems of using secondary construction resources in the reconstruction of real estate objects] *Ekonomika stroitel'stva* [Economics of construction]. No. 4. P. 2–12.
14. Kravtsova M.V., Vasiliev A.V., Kravtsov A.V., Nosarev N.S. (2015) *Analiz metodov utilizatsii otkhodov stroitel'stva s posleduyushchim вовлечением их во вторичный оборот* [Analysis of methods of utilization of construction waste with their subsequent involvement in secondary circulation] *Izv. Samarskogo nauch. tsentra RAN* [News of Samara scientific center of RAS]. Vol. 17. No. 4 (4). P. 804–809. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27035395> (date of access: 07.08.2020).
15. Kravchenko I.N., Biryukov A.N., Trostin V.P., Fedorov A.O. (2019) *Modernizatsiya tekhnologicheskogo oborudovaniya po obogashcheniyu mestnykh stroitel'nykh materialov i utilizatsii razrushennykh konstruktsiy* [Modernization of technological equipment for the enrichment of local building materials and utilization of destroyed structures] *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and road machines]. No. 12. P. 44–51.
16. Lunev G.G. (2014) *Analiz ekonomicheskoy effektivnosti tsikla pererabotki vtorichnykh stroitel'nykh resursov* [Analysis of the economic efficiency of the recycling cycle of secondary construction resources] *Vestnik YuRGU*

(NPI) [Bulletin of YURSTU (NPI)]. No. 1. P. 127–137. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21830640> (date of access: 07.08.2020).

17. Marugin V.M., Azgaldov G.G., Belov O.E., Biryukov A.N. (2008) *Kvalimetriceskaya ekspertiza stroitel'nykh ob"ektov* [Qualimetric examination of construction projects] *Politekhnik* [Polytechnic]. St. Petersburg. P. 527.

18. *Mobil'nyy kompleks pererabotki polimernykh otkhodov: pat. 195999 Rossiyskaya Federatsiya: MPK B29B 17/00, B29B 11/10, B29B 13/02*/M.Yu. Glyakov, R.O. Gol'tsin, Yu.A. Biryukov, A.N. Biryukov, M.S. Shkirya; *Sankt-Peterburg. Voennaya akademiya material'no-tekhnicheskogo obespecheniya im. generala armii A.V. Khruleva* [Mobile complex for processing polymer waste: US Pat. 195999 Russian Federation: IPC B29B 17/00, B29B 11/10, B29B 13/02. M.Yu. Glyakov, R.O. Gol'tsin, Yu.A. Biryukov, A.N. Biryukov, M.S. Shkirya. Military Academy of Logistics. General of the Army A.V. Khrulev]. St. Petersburg. No. 2019117343. Declared 04.06.2019; publ. 12.02.20. Bul. No. 5. P.3.

19. Oleinik S.P. (2006) *Edinaya sistema pererabotki stroitel'nykh otkhodov* [Unified system for processing construction waste] *SvR-ARGUS* [SvR-ARGUS]. P. 336.

20. Prokhotskiy Yu.M., Lunev G.G. (2010) *Organizatsionnye i ekonomicheskie problemy ispol'zovaniya vtorichnykh stroitel'nykh resursov pri rekonstruktsii ob"ektov nedvizhimosti* [Organizational and economic problems of the use of secondary construction resources in the reconstruction of real estate objects] *Innovatika i ekspertiza* [Innovation and expert examination]. Issue. fourteen. P. 81–94. Available at: http://inno-exp.ru/archive/04/innov_4_2010_81-94.pdf (date of access: 07.08.2020).

21. Skochikhina T.V. (2015) *Dinamika pererabotki stroitel'nykh otkhodov, obrazuyushchikhsya na territorii Sankt-Peterburga* [Dynamics of processing construction waste generated on the territory of St. Petersburg] *Nauch. zhurnal NIU ITMO. Seriya Ekonomika i ekologicheskii menedzhment* [Scientific. NRU ITMO magazine. Ser. Economics and Environmental Management]. No. 1. P. 228–238. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23216645> (date of access: 07.08.2020).

22. Stalnaya M.I. (2014) *Tekhnologicheskaya pererabotka otkhodov plastmass v stroitel'nyy material* [Technological processing of plastic waste into building material] *Aktual'nye problemy razvitiya nauki i obrazovaniya* [Actual problems of the development of science and education]. Moscow. P. 141–143.

23. *Ustroystvo dlya transportirovki blok-konteynera: pat. 189398 Rossiyskaya Federatsiya: MPK B60R 3/36*/Yanovich K.V., Lunev A.S., Biryukov Yu.A., Biryukov A.N.; *Sankt-Peterburg. Voennaya akademiya material'no-tekhnicheskogo obespecheniya im. generala armii A.V. Khruleva* [Device for transporting a block container: US Pat. 189398 Russian Federation: IPC B60R 3/36. Yanovich K.V., Lunev A.S., Biryukov Yu.A., Biryukov A.N.; Military Academy of Logistics. General of the Army A.V. Khrulev]. No. 2018142334. Declared 29.11.2018; publ. 21.05.2019. St. Petersburg. Bul. No 15. P. 3.

24. Bolotin S., Biryukov A. (2013) Time Management in Drafting Probability Schedules for Construction Work. *World Applied Sciences Journal*. No. 13. P. 1–4.

25. Biryukov A.N., Bulanov A.I., Ivanovsky V.S., et al. (2012) Basics of organization, economy and management in construction. *Spetsstroy Russia Publishing*. Moscow. P. 319–322.

26. Biryukov A., Bolotin S. (2015) Construction of temporary accommodation camp and selection of optimal type of building. *Periodical «Applied Mechanics and Materials»*. Vol. 725–726. P. 105–110; 2015. Trans Tech Publications, Switzerland. Online available since 2015/Jan/29 at www.scientific.net. ISSN 2304-6295, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.105 (data access: 07.08.2020).

27. Dobryshkin E.O., Biryukov A.N., Biryukov Yu.A., Tishchenko V.A. (2020) Complex approach to organizations' capital assets reproduction. *E3S Web of Conferences* 157, 04026 KTTI-2019. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015704026> (date of access: 07.08.2020).

DOI 10.35264/1996-2274-2020-2-160-169

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ В ТЕХНОЛОГИИ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА

Н.И. Буравчук, зав. лаб. ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» (ЮФУ),
канд. хим. наук, nburavchuk@sfedu.ru

О.В. Гурьянова, ст. науч. сотр. ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»
(ЮФУ), guryanovaolga@mail.ru

Рецензент: Пухаренко Ю.В.

В статье приведены исследования горелых пород шахтных отвалов, золошлаковых отходов и глинистого сырья в целях использования их в технологии керамического кирпича. Приведены показатели их качества. По свойствам и составу это сырье близко к глинистому. Разработаны составы и технологические режимы изготовления керамического кирпича с использованием горелых пород шахтных отвалов и золошлаковых отходов. Приведены результаты лабораторных исследований и промышленных испытаний. Доказана возможность применения этого техногенного сырья в технологии керамического кирпича. Применение горелых пород и золошлаковых отходов в составах для керамического кирпича позволяет повысить качество кирпича, увеличить прочность и морозостойкость марки, и по всем показателям опытные образцы керамического кирпича соответствуют требованиям нормативной документации.

Вовлечение техногенного сырья в производство позволяет экономить часть природного сырья, снизить стоимость продукции при улучшении ее качества, способствует снижению негативного влияния отходов на окружающую среду в районах их размещения.

Ключевые слова: техногенное сырье, горелые породы шахтных отвалов, золошлаковая смесь, технологические режимы, керамический кирпич, прочность и морозостойкость керамического кирпича.

USE OF TECHNOGENIC RAW MATERIALS IN THE TECHNOLOGY OF CERAMIC BRICKS PRODUCTION

N.I. Buravchuk, Head of Laboratory, Southern Federal University (SFEDU),
Doctor of Chemistry, nburavchuk@sfedu.ru

O.V. Guryanova, Senior Researcher Southern Federal University (SFEDU),
guryanovaolga@mail.ru

The article presents the results of a study of burnt rocks of mine dumps, ash and slag waste and clay raw materials for the purpose of their use in the technology of manufacturing ceramic bricks. Indicators of their quality are given. In terms of properties and composition, this raw material is close to clay. Compositions and technological modes for the manufacture of ceramic bricks using burnt rocks of mine dumps and ash and slag waste have been developed. The results of laboratory research and industrial tests are presented. The possibility of using this technogenic raw material in the technology of manufacturing ceramic bricks has been proven. The use of burnt rocks and ash and slag waste in the compositions for the manufacture of ceramic bricks can improve its quality, including strength and frost resistance. In all respects, prototypes of ceramic bricks meet the requirements of regulatory documents. The involvement of technogenic raw materials in

production allows you to save part of natural raw materials, reduce the cost of products while improving their quality, and help reduce the negative impact of waste on the environment in the areas of their location.

The involvement of technogenic raw materials in production allows you to save part of natural raw materials, reduce the cost of products while improving their quality, and help reduce the negative impact of waste on the environment in the areas where they are located.

Keywords: technogenic raw materials, burnt rocks of mine dumps, ash and slag mixture, technological modes, ceramic bricks, strength and frost resistance of ceramic bricks.

Введение

Керамическая промышленность развивается, создавая и заполняя новые ниши в меняющихся условиях. Керамические изделия имеют практически неограниченный срок службы. Такие изделия, как стеновой кирпич, керамическая черепица, фасадные и облицовочные плитки, художественная и гончарная керамика и др., по цвету, фактуре, форме архитектурно более выразительны, долговечны. Керамический кирпич остается основным материалом стеновой керамики. Сооружения из керамических материалов воспринимаются как престижные, их эстетическая привлекательность с течением времени сохраняется.

Керамическая промышленность, как и другие направления промышленности строительных материалов, испытывает дефицит минерального сырья в связи с истощением природных запасов. Кроме того, качество природного сырья зачастую снижается. Сырье приходится корректировать добавками или другими видами сырья, например техногенным.

Развитие современных инновационных технологий производства строительных материалов в XXI в. предопределяет использование в качестве дополнительных источников сырья техногенных отходов. Это обусловлено, с одной стороны, истощением запасов природного сырья, с другой — интенсивным накоплением промышленных отходов. При значительных объемах техногенных скоплений уровень их утилизации невысок. Однако современные технологии позволяют использовать техногенное сырье как один из перспективных ресурсов для отдельных отраслей производства материалов нового качества, с лучшими потребительскими свойствами.

Основным потребителем промышленных отходов может быть строительная индустрия. В этом направлении производственной деятельности человечество использует природные ресурсы, максимально готовые к употреблению, так как они требуют минимальных затрат труда. Извлечение природных ресурсов из взаимосвязанных естественных состояний, где их присутствие обеспечивает равновесие и устойчивость окружающей среды, вносит дисбаланс в систему самоорганизационных процессов геосистемы. Уменьшить это разбалансирование можно изменением природной сырьевой базы стройиндустрии путем пополнения ее сырьем нового вида — техногенным. Ценность техногенного сырья при изготовлении строительных материалов может быть значительной.

К техногенному сырью, наиболее близкому по составу и свойствам к глинистому сырью, используемому в технологии керамических изделий, относятся шахтные породы и золошлаковые отходы. Имеющиеся разработки [1—8] по изготовлению строительных материалов из пород шахтных отвалов и золошлаковых отходов свидетельствуют о технико-экономическом интересе, который вызывает этот вид техногенного сырья. Это связано, во-первых, с имеющимися огромными запасами шахтных пород и золошлаковых отходов во всех угледобывающих регионах, во-вторых, с обострившейся экологической ситуацией вблизи шахтных терриконов и золоотвалов, в-третьих, с поисками нового минерального сырья, равноценного по качеству и свойствам традиционному, но более доступного и дешевого. Однако широкого вовлечения в производство запасов сырья из отвалов пока не происходит. Основные причины этого — неоднородность состава и свойств пород, отсутствие информации

об их экологической безопасности, необходимость дополнительных затрат на их обогащение при переработке.

Методика

Для использования золошлаковых отходов и горелых пород в технологии изготовления керамического кирпича были отобраны технологические пробы техногенного и глинистого сырья и проведена комплексная оценка качества техногенного сырья. Отбор проб породной массы проводился в соответствии с указаниями общепринятых методик и требованиями нормативных документов. В основу опробования отвала положен принцип отбора точечных проб. Общий вес отобранной из отвала породной массы составил примерно 200–250 кг.

Усредненные пробы составлялись из точечных проб путем тщательного перемешивания. На лабораторно-аналитические исследования отбирались усредненные пробы методом квартования. Выполнены аналитико-лабораторные исследования. Этот подход заключается в получении первичной информации о химическом и вещественном составе сырья. В дальнейшем проведены физико-механические и технологические испытания. Отрабатываются технологические режимы, которые затем проверяются и корректируются в опытно-промышленных условиях при выпуске опытной партии керамического кирпича.

По результатам всех исследований и испытаний откорректирован технологический регламент производства керамического кирпича с использованием горелых пород шахтного отвала и золошлаковых отходов.

Результаты

Характерная особенность Ростовской обл. — многочисленные терриконы, хвостохранилища, золоотвалы, в которых складированы огромные запасы шахтных пород и золошлаковых отходов. Глинистое сырье в Ростовской обл. представлено в основном суглинками и низкодисперсными глинами, из которых трудно получить керамические изделия повышенной прочности и морозостойкости. Проблема улучшения качества глинистого сырья для производства керамических изделий существует не только для Ростовской обл., но и для других регионов страны. Одним из способов регулирования технологических свойств глинистого сырья является использование корректирующих добавок. Цель данной работы заключается в установлении возможности использования горелых пород шахтных отвалов и золошлаковых отходов в технологии изготовления керамических изделий.

Объект исследования данной работы — горелые шахтные породы отвала № 2/1 шахты им. Артема и золошлаковая смесь Артемовской ТЭЦ. Это продукты термического воздействия на углевмещающие породы и минеральные составляющие углей. Условия образования этих материалов различны. Горелые породы образуются при длительном самообжиге угленосных пород, который происходит в терриконах — конусообразных отвалах вблизи угольных шахт — при температуре 600–1000 °С. Под влиянием кислорода воздуха происходит самопроизвольное выгорание органических веществ и серы, продолжающееся десятки лет. У горелых пород содержание углистых примесей не превышает 5,0 %. Хорошо обожженные горелые породы однородного сложения, с плотной структурой и гладкой камневидной поверхностью в изломе из отвалов антрацитовых углей отличаются повышенной механической прочностью, стойкостью к истиранию, температурным и атмосферным воздействиям.

По литологическому составу породной массы отвал № 2/1 шахты им. Артема — глинистый. Он представлен глинистыми (аргиллито-алевролитовыми) породами, встречаются также песчано-глинистые, слабопесчанистые, углистые и глинистые сланцы, песчаники. Глинистая составляющая по составу — гидрослюдистая, с примесью каолинита и хлорита. Глины в угольных пластах настолько уплотнились под влиянием горного давления, что утратили пластичность.

Золошлаковые отходы — это продукт сжигания угля в топках котлов при температурах выше 1000 °С, вплоть до 1700 °С. По химическому, гранулометрическому и фазово-минералогическому составу эти отходы во многом идентичны природному минеральному сырью.

В золах и горелых породах присутствуют основные группы веществ: кристаллические, аморфные и органические. Аморфная составляющая зол представлена стеклофазой и аморфизованным глинистым веществом — метакаолинитом, аморфным кремнеземом и глиноземом. При исследовании отходов методами физико-химического анализа установлено, что кристаллическая фаза золы и горелой породы включает слабоизмененные зерна минералов исходного топлива: кварца и его модификаций, полевых шпатов и прочих термически устойчивых минералов. Встречаются кристаллические новообразования, возникшие при сжигании топлива (муллит, гематит, магнетит, силикаты кальция и др.). Несгоревшие частицы топлива, присутствующие в качестве примесей, в разной степени метаморфизованы, отличны от исходного состояния и присутствуют в виде кокса, полукокса и графитизированного углистого вещества. Продукты коксования (полукоксостовые и коксовостовые остатки) стойки к окислению и долговечны при воздействии влаги и перепада температуры.

В качестве глинистой составляющей в керамических массах использовано сырье III участка Октябрьского месторождения. В табл. 1 приведены усредненные данные по химическому составу исходных компонентов шихты.

Таблица 1

Химический состав компонентов керамических масс

Наименование пробы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ общ.	CaO	MgO	SO ₃ общ.	TiO ₂	K ₂ O + Na ₂ O	П.п.п.*
Глина Октябрьского месторождения (III участок)	58,25	12,35	4,42	8,48	1,94	0,21	0,66	3,44	10,14
Золошлаковая смесь Артемовской ТЭЦ	52,63	20,73	5,06	2,12	1,76	0,77	0,55	4,77	11,5
Горелая порода отвала 2/1 шахты им. Артема	53,89	22,53	6,02	1,22	1,53	2,11	1,19	5,19	3,95

* П.п.п. — потери при прокаливании.

Химический состав исследуемого техногенного сырья представлен в основном оксидами кремния, алюминия и железа, и по модулю основности, учитывающему соотношение глинозема и кремнезема, исследуемое техногенное сырье относится к кислому, с высоким содержанием красящих оксидов. По химическому, гранулометрическому и фазово-минералогическому составу эти отходы во многом идентичны природному минеральному сырью. Состав горелых пород и золошлаковых отходов и их свойства нестабильны. Это один из главных сдерживающих факторов для широкомасштабного использования этого техногенного сырья. Однако при соблюдении рекомендуемых технологических приемов при подготовке и переработке отходов из них может быть получена качественная продукция.

Глинистое сырье представлено суглинками. Цвет глин меняется от желтого до темно-бурого с белыми включениями. Глинистое сырье вскипает при обработке 10 %-ным раствором соляной кислоты. Структура глин — разнотекстурированная и агрегативно-зернистая, неоднородная, некоторые отдельные агрегаты сцементированы между собой, в сухом виде с трудом разламываются руками. Текстура глинистой породы беспорядочна: рыхлая, комковатая.

Основными примесями данного глинистого сырья являются кварцевый песок, карбонаты, железистые соединения, зерна полевого шпата, органические примеси, растительные остатки. Карбонатная составляющая представлена в основном органогенным кальцитом, встречается в глине в виде тонкодисперсных равномерно распределенных пылеватых частиц, рыхлых примазок и скоплений, плотных каменистых включений. Рыхлые примазки

и скопления при механической обработке разрушаются и превращаются в равномерно распределенную тонкодисперсную примесь, и поэтому они существенно не влияют на свойства глины и качество обожженного черепка. Глинистая часть представлена гидрослюдистой составляющей с незначительной примесью каолинита и монтмориллонита. Пылеватая фракция представлена в основном кремнеземом, углекислым кальцием, оксидами железа, песчаная — кварцем. По степени пластичности данные суглинки относятся к группе среднепластичного сырья, по чувствительности к сушке — к группе высокочувствительного глинистого сырья. По огнеупорности суглинки относятся к группе легкоплавкого сырья (температура плавления — 1130 °С), по степени спекания — к группе неспекающегося глинистого сырья. В температурном интервале 900–1100 °С огневая усадка составила 0,2–0,8 %, общая усадка — 10,8–11,0 %, кажущаяся плотность — 1,96–2,04 г/см³, водопоглощение — 13,7–14,9 %. Формовочная влажность находится в пределах 26,5–28,5 %. Формовочная способность глинистого сырья — удовлетворительная.

Сушильные свойства сырья определяли по методу А.Ф. Чижского [9] на образцах-плитках размером 160 × 160 × 10 мм. На рис. 1 приведены результаты графического определения критической влажности глины, используемой для расчета коэффициента чувствительности глины к сушке.

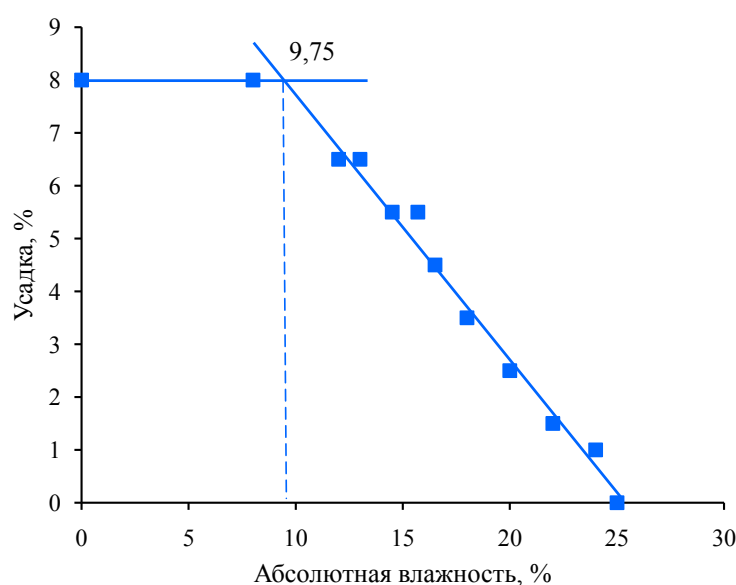


Рис. 1. Графический способ определения критической влажности глины III участка Октябрьского месторождения по методу А.Ф. Чижского

Коэффициент чувствительности к сушке вычислялся по формуле:

$$K_{\text{ч}} = (W_{\text{н}} - W_{\text{к}}) / W_{\text{к}}.$$

В соответствии с классификацией Научно-исследовательского института керамики используемое глинистое сырье по чувствительности к сушке ($K_{\text{ч}} = 1,63$) относится к группе высокочувствительного глинистого сырья. Линейная воздушная усадка исследуемого суглинка составила 10,0 %.

В табл. 2 приведены результаты испытаний свойств глины после обжига.

Таблица 2

Физико-механические свойства свойства обожженных образцов глины

Проба	Температура обжига, °С	Огневая усадка, %	Прочность на сжатие, кг/см ²	Прочность при изгибе, кг/см ²	Объемная масса, кг/м ³	Водопоглощение, %
Глина	970	0,55	254,1	32,3	1986	14,88
		0,53	226,2	28,7	1974	14,80
		0,53	224,7	26,5	1975	14,73
Среднее значение		0,54	235,0	29,17	1978	14,80

По степени пластичности испытываемая глина относится к группе среднепластичного глинистого сырья, число пластичности – 23,0–26,2 %. В данном случае глина отличается повышенным содержанием пылеватых частиц, высокой пластичностью и чувствительностью к сушке, наличием карбонатных включений.

Для снижения усадочных свойств глины вводились отошующие добавки: золошлаковая смесь и отсев дробленой горелой породы шахтного отвала. Для снижения влияния вредных включений на качество керамического кирпича рекомендуется тонкое измельчение глинистого сырья на камневыделительных вальцах.

Горелые породы шахтного отвала подвергались дроблению. В составах шихты для кирпича использовалась фракция 0–3 мм. Рекомендуемый гранулометрический состав отсева дробления шахтной породы: 2,0–0,5 мм – 50 %, менее 0,5 мм – 45 %, содержание частиц свыше 2 мм – 5 %. Золошлаковая смесь использовалась без особой подготовки, кроме подсушивания. Зерновой состав – в пределах 0–3 мм. Влажность отошующих добавок – 2–3 %. Экспериментальные составы керамических масс приведены в табл. 3.

Таблица 3

Составы шихты для керамического кирпича

Номер состава	Компоненты, вес. %		
	Суглинок	Золошлаковая смесь	Горелая порода
1	62,0	25,0	13,0
2	60,0	20,0	20,0
3	64,0	22,0	14,0
4	66,0	18,0	16,0
5	58,0	24,0	18,0

Компоненты смешивали, увлажняли до формовочной влажности по технологии пластического формования, после 5-суточного вылеживания шихты формовали образцы: кубы с размером ребра 50 мм – для определения прочности на сжатие; балочки размером 160 × 40 × 40 мм – для испытания прочности на изгиб; плиточки – для оценки усадочных изменений при сушке и обжиге. Значения коэффициента чувствительности к сушке опытных составов шихты находились в пределах 0,98–1,16.

После сушки образцов до остаточной влажности 3–4 % их подвергали обжигу. Максимальная температура обжига образцов составляла 970 °С.

Образцы после обжига дефектов не имеют. Структура черепка – плотная. Образцы – терракотового и кирпично-красного цвета, цвет равномерно распределен, налет отсутствует, в изломе сердцевина светло-серого цвета. Появление такого цвета связано с присутствием закисных форм железа. Известковые включения отсутствуют.

Результаты испытаний образцов пяти опытных составов керамических масс приведены в табл. 4.

Таблица 4

Физико-механические свойства опытных составов керамических масс после обжига

№ состава	Максимальная температура обжига, °С	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности при изгибе, МПа	Общая усадка, %	Водопоглощение, %	Объемная масса, кг/м ³
1	970	23,85	5,06	4,9	18,9	1746
2		27,70	5,27	5,2	20,3	1762
3		19,88	4,46	5,8	18,5	1744
4		25,00	5,50	6,6	18,2	1785
5		21,98	5,05	5,3	18,7	1766

Добавки золошлаковых отходов и отсеков дробления горелых пород оказывают положительное влияние на сушильные свойства керамических масс: снижается коэффициент чувствительности к сушке на 39,9 %, уменьшается общая усадка на 53,5 %. Формовочная влажность масс находится в пределах 21,6–24,4 %. По прочности при сжатии образцы соответствуют маркам кирпича М200, М250, при изгибе – марке М300.

На технологической линии и оборудовании ООО «Шахтинский кирпичный завод» проведены производственные испытания. Выпущены опытные партии керамического кирпича составов № 2 и 4.

Подготовка суглинка, отошающих добавок и шихты проведена по технологии, принятой на заводе. Экспериментальные кирпичи были изготовлены из составов, подобранных при лабораторных исследованиях. Формование осуществлялось на ленточном вакуум-прессе СМК-325 методом экструзии. Резка бруса полнотелого кирпича, выходящего из мундштука, осуществляется резательным автоматом СП-5М. Глубина вакуума в вакуум-прессе составляла 93 МПа.

После формования кирпич-сырец автоматом-укладчиком укладывался на рамы и подавался в туннельные сушилки. Отформованные изделия сушили в туннельной прямоточно-противоточной сушилке с верхним подводом и отводом теплоносителя в течение 48 ч. Высушенные до влажности 6–9 % кирпичи направлялись на обжиг в туннельную печь. Кирпич обжигали в туннельной печи в течение 38 ч. Максимальная температура обжига – 925–930 °С. Время выдержки при максимальной температуре – 1 ч 50 мин.

Результаты испытаний керамического кирпича опытных партий приведены в табл. 5.

Таблица 5

Физико-механические свойства керамического кирпича опытных партий

Номер состава	Прочность, МПа		Объемная масса, кг/м ³	Водопоглощение, %	Морозостойкость, марка
	Сжатие	Изгиб			
2	26,6	4,85	1720	16,8	F50
4	23,8	4,73	1756	18,3	F50

По показателям прочности (при сжатии и изгибе) партии кирпичей соответствуют маркам 200 и 250. При испытании кирпича на морозостойкость повреждений не наблюдалось. Керамические кирпичи пластического прессования выдержали 50 циклов попеременного замораживания и оттаивания и по морозостойкости соответствуют марке F50.

Обсуждение

Золошлаковая смесь использовалась в основном как топливосодержащая добавка, улучшающая гранулометрический состав шихты и оказывающая пластифицирующий эффект. Отсевы дробления шахтной породы влияют на формирование структурного каркаса шихты и как отошающая добавка, изменяющая сушильные свойства керамической массы.

Керамические массы из различных сырьевых материалов имеют общие закономерности физико-химических превращений при их термической обработке [10, 11]. Важнейшими из них являются: разложение и превращение минералов исходного сырья, химическое взаимодействие их компонентов, явления, происходящие на контакте зерен в присутствии жидкой фазы, растворение твердых частиц в расплаве, образование новых кристаллических соединений и т. д.

Совместное введение двух видов отходов наиболее благоприятно влияет на свойства готовых изделий. Мелкозернистые и тонкодисперсные фракции породы и золошлаковой смеси являются не только отошающей, снижающей чувствительность шихты к сушке, но и легкоплавкой добавкой.

Содержание оксидов железа, углистой составляющей, щелочных оксидов интенсифицирует процесс спекания черепка и способствует образованию легкоплавких соединений и кристаллизации новообразований на ранней стадии обжига. В результате температура обжига снижается на 50–80 °С, повышаются механическая прочность и другие характеристики керамических изделий.

По физико-механическим свойствам (присутствие коксовых остатков, аморфизованных глинистых минералов, стеклофазы и т. д.) горелые породы и золошлаковые смеси в составе керамических масс выполняют роль микронаполнителя, плавня, углесодержащей составляющей. Введение таких комплексных добавок интенсифицирует процесс спекания сырьевых смесей за счет образования легкоплавких эвтектик, увеличения стекловидной фазы и подвижности силикатного расплава, его реакционной способности. Взаимодействие оксидов основных минералов в исследуемых системах начинается еще в твердой фазе (до 700 °С), продолжается в расплаве и заканчивается упрочнением структуры в результате интенсивной кристаллизации (950–970 °С) соединений, что придает изделиям прочность, плотность, термостойкость, огнеупорность, морозостойкость и другие ценные свойства. Нарастание прочности черепка изделий при максимальных температурах обжига в пределах 950–1050 °С объясняется как влиянием вновь образующихся соединений, так и действием расплава, который благодаря энергии поверхностного натяжения сближает и связывает частицы массы в монолит. Структура керамического кирпича — плотная и однородная (рис. 2).

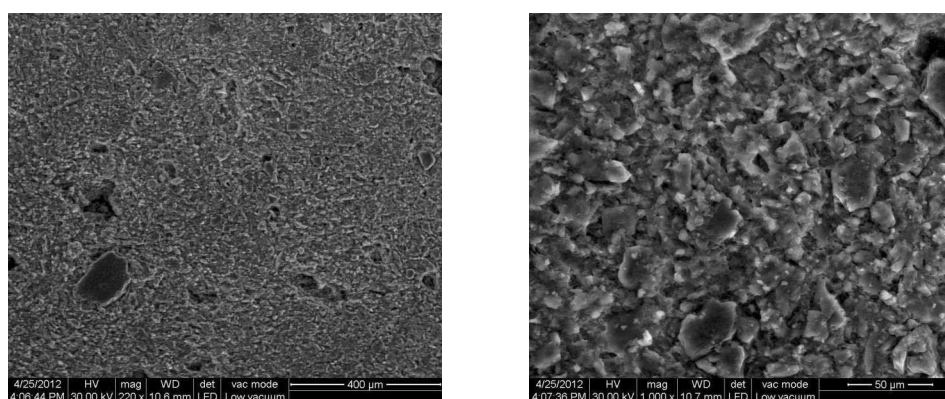


Рис. 2. Микроструктура керамического черепка с добавками горелых пород и золошлаковых смесей:

а) увеличение — 220х; разрешение — 400 μм; б) увеличение — 1000х; разрешение — 50 μм

Оптимально подобранные зерновой и минеральный состав шихты, режимы формования и обжига способствуют уменьшению чувствительности шихты к сушке, расширению интервала спекания, исключению образования напряжений в структуре материала, снижению усадки, получению плотного керамического черепка повышенной прочности, морозостойкости, минимизации процента брака готовых изделий.

Заключение

Полученные положительные результаты лабораторных исследований и производственных испытаний подтверждают возможность применения горелых пород шахтных отвалов и золошлаковых смесей в технологии изготовления керамического кирпича, получении качественной продукции, соответствующей требованиям нормативных документов. Хорошая формуемость масс с добавками отсевов дробленой горелой породы и золошлаковой смеси обеспечивает правильность формы и точность размеров изделий. Это позволяет применять их в производстве фасонных изделий, к которым предъявляются жесткие требования в отношении правильности формы и точности размеров, а также повышенной плотности.

Исследуемое техногенное сырье можно использовать также в технологии полусухого прессования. Формовочная влажность для полусухого прессования составляет 7–9 %, давление прессования – 30–35 МПа, температура обжига – 980–1000 °С.

Огнеупорность горелых пород шахтных отвалов – 1250–1380 °С. В технологии производства огнеупорных изделий они могут заменить дорогостоящий шамот, который получают обжигом каолинита.

С использованием в области на некоторых отвалах дробильно-сортировочных комплексов по переработке и подготовке кондиционного сырья из горелых пород у предприятий стройиндустрии появляется реальная возможность более широко использовать это сырье в производстве строительной керамики и огнеупоров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Южного федерального университета, 2020 г. (Министерство науки и высшего образования Российской Федерации) по проекту ВнГр-07/2020-04-ИМ.

Список литературы

1. Абдрахимова Е.С. Использование отходов топливно-энергетического комплекса – горелых пород и отходов обогащения хромитовых руд в производстве пористых заполнителей на основе жидкостекольной композиции // Уголь. 2019. № 7. С. 67–69.
2. Римкевич В.С., Пушкин А.А., Чурушова О.В. Комплексная переработка золы ТЭЦ // Горный информ.-аналит. бюл. (науч.-техн. журнал). 2015. № 6. С. 250–259.
3. Федорова Н.В., Шафорост Д.А. Перспективы использования золы – уноса тепловых электростанций Ростовской области // Теплоэнергетика. 2015. № 1. С. 53–58.
4. Чумаченко Н.Г., Тюрников В.В., Сейкин А.И., Баннова С.Е. Возможности использования горелых пород в строительстве // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 11. С. 41–48.
5. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В. Огороков Е.П., Павлова Л.Н. Использование техногенного сырья в технологии керамических материалов и изделий // Экологический вестник России. 2012. № 9. С. 38–45.
6. Мнухин А.Г. Породные отвалы – сырье будущего // Уголь Украины. 2009. № 5. С. 28–32.
7. Коваленко Л.И., Омельченко Н.П. Перспективы использования горелых пород шахтных отвалов // Проблеми екології. 2009. № 1–2. С. 16–19.
8. Буравчук Н.И. Ресурсосбережение в технологии строительных материалов. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. 224 с.
9. Книгина Г.И., Вершинина Э.Н., Тацки Л.Н. Лабораторные работы по технологии строительной керамики и искусственных пористых заполнителей. М.: Высшая школа, 1985. С. 91–94.
10. Салахов А.М., Кабиров Р.Р., Морозов В.П. и др. Исследование структуры и фазового состава глины в процессе их термической обработки // Строительные материалы. 2017. № 9. С. 18–22

11. Абдрахимов В.З., Денисов Д.Ю. Исследование фазовых превращений на различных этапах обжига керамзита из межсланцевой глины // Изв. вузов. Строительство. 2011. № 10. С. 34–42.

References

1. Abdrakhimova E.S. (2019) *Ispol'zovanie otkhodov toplivno-energeticheskogo kompleksa – gorelykh porod i otkhodov obogashcheniya khromitovykh rud v proizvodstve poristyykh zapolniteley na osnove zhidkostekol'noy kompozitsii* [The use of fuel and energy complex waste – burnt rocks and waste of chromite ore dressing in the production of porous aggregates based on liquid glass composition] *Ugol* [Coal]. No. 7. P. 67–69.
2. Rimkevich V.S., Pushkin A.A., Churushova O.V. (2015) *Kompleksnaya pererabotka zoly TETs* [Complex ash processing of CHPP] *Gornyy inform.-analit. byul. (nauch.-tekhn. zhurnal)* [Gorny inform.-analyt. bul. (Scientific and technological journal)]. No. 6. P. 250–259.
3. Fedorova N.V., Shaforost D.A. (2015) *Perspektivy ispol'zovaniya zoly – unosa teplovykh elektrostantsiy Rostovskoy oblasti* [Prospects for the use of ash – carryover from thermal power plants of the Rostov region] *Teploenergetika* [Teploenergetika]. No. 1. P. 53–58.
4. Chumachenko N.G., Tyurnikov V.V., Seikin A.I., Bannova S.E. (2015) *Vozmozhnosti ispol'zovaniya gorelykh porod v stroitel'stve Rossii* [Possibilities of using burnt rocks in construction] *Ekologiya i promyshlennost'* [Ecology and Industry of Russia]. Vol. 19. No. 11, P. 41–48.
5. Buravchuk N.I., Guryanova O.V., Okorokov E.P., Pavlova L.N. (2012) *Ispol'zovanie tekhnogennogo syr'ya v tekhnologii keramicheskikh materialov i izdeliy* [The use of technogenic raw materials in the technology of ceramic materials and products] *Ekologicheskii vestnik Rossii* [Ecological Bulletin of Russia]. No. 9. P. 38–45.
6. Mnukhin A.G. (2009) *Porodnye otvaly – syr'e budushchego* [Rock dumps – raw materials of the future] *Ugol' Ukrainy* [Coal of Ukraine]. No. 5. P. 28–32.
7. Kovalenko L.I., Omelchenko N.P. (2009) *Perspektivy ispol'zovaniya gorelykh porod shakhtnykh otvalov* [Prospects for the use of burnt rocks in mine dumps] *Problemi ekologii* [Ecological Problems]. No. 1–2. P. 16–19.
8. Buravchuk N.I. (2009) *Resursoberezhenie v tekhnologii stroitel'nykh materialov* [Resource saving in building materials technology] *Izd-vo YuFU* [SFedU Publishing House]. Rostov-on-Don. P. 224.
9. Knigina G.I., Vershinina E.N., Tatski L.N. (1985) *Laboratornye raboty po tekhnologii stroitel'noy keramiki i iskusstvennykh poristyykh zapolniteley* [Laboratory work on the technology of building ceramics and artificial porous aggregates] *Vysshaya shkola* [Higher school]. Moscow. P. 91–94.
10. Salakhov A.M., Kabirov R.R., Morozov V.P. et al. (2017) *Issledovanie struktury i fazovogo sostava glin v protsesse ikh termicheskoy obrabotki* [Investigation of the structure and phase composition of clays in the process of their heat treatment] *Stroitel'nye materialy* [Construction materials]. No. 9. P. 18–22.
11. Abdrakhimov V.Z., Denisov D.Yu. (2011) *Issledovanie fazovykh prevrashcheniy na razlichnykh etapakh obzhiga keramzita iz mezhsantsevoy gliny* [Study of phase transformations at different stages of firing expanded clay from interschist clay] *Izv. vuzov. Stroitel'stvo* [News of the Universities. Construction]. No. 10. P. 34–42.

DOI 10.35264/1996-2274-2020-2-170-177

УЛУЧШЕНИЕ РЕПРОДУКТИВНОЙ ФУНКЦИИ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА ПУТЕМ ПРОФИЛАКТИКИ НЕДОСТАТКА МЕДИ В ОРГАНИЗМЕ

Н.И. Ерохина, доц. каф. МГОТУ, канд. с.-х. наук, natali-1959@list.ru

Л.А. Зернаева, зам. нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. с.-х. наук, ZernaevaLA@extech.ru

Рецензент: Н.А. Комбарова

В молочном скотоводстве Российской Федерации имеются нерешенные проблемы, связанные с воспроизводством стада, которые существенно отражаются на экономической составляющей данной подотрасли животноводства. Одним из факторов, вызывающих нарушение репродуктивной функции животных, является недостаток меди в организме. Представленные материалы свидетельствуют о важности профилактики медной недостаточности у животных и дальнейших исследований в области биологического влияния данного микроэлемента на репродуктивную функцию.

Ключевые слова: воспроизводство стада, репродукция, молочное скотоводство, сервис-период, сухостойный период, выход телят, бесплодие, медь.

IMPROVING THE REPRODUCTIVE FUNCTION OF CATTLE BY PREVENTING COPPER DEFICIENCY IN THE BODY

N.I. Erokhina, Associate Professor, Moscow State Technological University, Doctor of Agriculture, natali-1959@list.ru

L.A. Zernaeva, Deputy Head of Department, SRI FRCEC, Doctor of Agriculture, ZernaevaLA@extech.ru

In the dairy cattle breeding of the Russian Federation, there are unresolved problems associated with the reproduction of the herd, which significantly affect the economic component of this subsector of animal husbandry. One of the factors causing impaired reproductive function in animals is the lack of copper in the body. The presented materials indicate the importance of the prevention of copper deficiency in animals and further research in the field of the biological effect of this microelement on reproductive function.

Keywords: herd reproduction, reproduction, dairy cattle breeding, service period, dry period, calf yield, infertility, copper.

Для молочного скотоводства Российской Федерации в последние годы характерен устойчивый рост объемов производства молока — как в хозяйствах всех категорий собственности, так и в сельскохозяйственных организациях (СХО).

Резервом для повышения интенсивности развития данной подотрасли животноводства является решение проблем, связанных, в том числе, с воспроизводством стада.

Экономические последствия этого комплекса проблем отражаются на чистом доходе от молочного хозяйства. Выручка снижается в результате уменьшения производства молока и телят, сокращения возможностей ремонта стада. Необходимость иметь больше ремонтного молодняка, ветеринарное обслуживание, лечение бесплодия и повторные осеменения увеличивают производственные затраты.

Вместе с тем основные показатели воспроизводства (продолжительность сервис- и сухостойного периодов, выход телят на 100 коров, средний возраст выбытия коров в отелах) даже в племенных хозяйствах Российской Федерации отличаются от оптимальных значений [3].

**Основные показатели воспроизводства в племенных хозяйствах
молочного скота Российской Федерации**

Показатели	Оптимальное значение	2013	2017	2018	2019
Средняя продолжительность, дней:					
– сервис-периода	85–90	128	131	131	130
– сухостойного периода	45–60	63	61	61	60
Выход живых телят на 100 коров, голов:					
– по племенным хозяйствам	85	81	81	81	81
– в целом по СХО	–	76	77	76	76
Средний возраст выбытия коров в отелах	4,5–5,0	3,5	3,39	2,56	3,18

Нарушение функции воспроизводства является основной причиной выбытия коров в странах с развитым молочным скотоводством. В Российской Федерации вследствие бесплодия и проблем с гинекологией выбывает до 24 % коров и первотелок [11]. По расчетным данным, сумма недополученной выручки только в связи с удлинением сервис-периода сопоставима с объемом всех фондов государственной поддержки молочного животноводства на федеральном уровне [11]. В связи с этим требуется дальнейшая реализация технологических решений по улучшению основных показателей воспроизводства как для товарной, так и для племенной части популяции молочного скота Российской Федерации.

В данной статье обсуждается влияние недостатка меди в организме на репродуктивную функцию крупного рогатого скота и актуальность его профилактики.

Известно, что микроэлементы вовлечены в разнообразные биологические процессы организма, так как являются кофакторами или составной частью различных ферментов, регулирующих практически все виды обмена веществ [5]. Значительное влияние они оказывают и на репродуктивную функцию животных [10]. Среди эссенциальных микроэлементов, регулирующих половую функцию животных, важнейшую роль играет медь [20]. Несмотря на многочисленные исследования на разных видах животных, биологические механизмы воздействия этого элемента на половую функцию самцов и самок окончательно не выяснены, и исследования в данном направлении продолжаются.

Медь является одним из незаменимых микроэлементов, участвующих в регуляции метаболизма в организме животных. Недостаточность меди у разных видов сельскохозяйственных животных отмечается вследствие ее низкого содержания в почвах и растительных кормах, что наряду с Российской Федерацией характерно для многих стран мира: США, Канады, Мексики, Ирландии, Англии, Чехии и других стран [16, 17, 28].

Пониженный уровень меди в организме оказывает негативное влияние на репродуктивную функцию самок и самцов. У самок увеличивается эмбриональная смертность, отмечается дисфункция яичников, снижается оплодотворяемость ооцитов, наблюдаются послеродовые гинекологические осложнения [7, 10, 20], а у самцов нарушается сперматогенез и снижается биологическая полноценность половых клеток.

Медь играет важную роль в синтезе гемоглобина, и при ее недостатке у животных развивается анемия, способствующая увеличению эмбриональной смертности у самок [20]. Имеются данные, что этот микроэлемент играет важную роль в синтезе половых гормонов в яичниках и семенниках животных [13]. Гипокупремия у самок может способствовать за-

держке полового созревания, снижать оплодотворяемость ооцитов, вызывать раннюю эмбриональную смертность и увеличивать число случаев задержания последа [29].

К другим распространенным признакам недостаточности меди в организме относятся: обесцвечивание и нарушение структуры шерстного покрова, спонтанные переломы конечностей, усиление проницаемости капилляров, дегенерация миокарда, гипомиелинизация спинного мозга, снижение резистентности к инфекционным заболеваниям, диарея [31].

Гипокупремия у жвачных животных может быть обусловлена двумя основными причинами: первичный дефицит меди возникает в результате кормления пищей с пониженным содержанием меди в кормах; вторичный дефицит развивается при кормлении животных пищей с повышенным уровнем молибдена, цинка и железа, являющихся антагонистами ионов меди.

У крупного рогатого скота при недостаточном содержании меди в организме, особенно в пастбищный период, отмечаются низкая оплодотворяемость, увеличение продолжительности сервис-периода, длительный анэструс, аборт и эмбриональная смертность, а у молодняка задерживается половое созревание [10]. Так, у коров с гипокупремией, в сравнении с животными с достаточным уровнем меди, сервис-период составил 70 против 56 дней, а число осеменений на плодотворное осеменение — 4,4 против 1,1 дней соответственно [15]. У телок, получавших рацион с добавлением молибдена, начало половой цикличности задерживалось на 8–12 недель, а оплодотворяемость от первичного осеменения составила только 14 % в сравнении с 75 % в контроле. В опытной группе у 20 % телок были выявлены ановуляторные циклы против 2,5 % в контроле. По данным иранских исследователей, при анализе крови у 198 абортировавших коров голштинской породы в 16 стадах признаки гипокупремии были выявлены у 88 % животных [29].

При гипокупремии у коров нарушается процесс образования стероидных гормонов в яичниках и снижается уровень секреции прогестерона в лютеальную фазу полового цикла [24]. Экспериментально доказано, что недостаток меди у коров приводит к нарушению имплантации эмбрионов и повышению эмбриональной смертности.

Дополнительное введение меди при ее недостатке в организме самок, обычно всегда оказывает положительное влияние на репродуктивную функцию. Например, коровам с пониженным уровнем меди в организме добавляли в рацион сернокислую медь [2]. При этом возросла оплодотворяемость самок от первичного осеменения: 69,2 % против 44,4 % в контроле. Кроме того, у коров опытной группы значительно сократилась продолжительность эструса.

Ежедневное скармливание коровам в другом эксперименте по 0,5 г сульфата меди способствовало сокращению межотельного периода до 408 дней против 511 дней в контроле. Причем скармливание данной дозы меди в течение 6 лет не оказало токсичного влияния на животных [20].

Дополнительное введение меди в рацион высокопродуктивных коров приводило к сокращению сервис-периода на 18 дней, повышало их оплодотворяемость и значительно снижало процент послеродовых гинекологических осложнений [7].

Обогащение рациона коров хелатными соединениями меди в форме глицината меди сократило продолжительность сервис-периода на 32 дня и повысило оплодотворяемость коров на 5 % по сравнению с группой, где использовали подкормку животных сульфатом меди [1].

Подкожные инъекции коровам триптофаната и метионината меди также способствовали повышению оплодотворяемости коров и снижению сервис-периода [8].

Однократное внутримышечное введение коровам перед первым осеменением комплексоната меди с ЭДТА в дозе 1,0 мг/кг массы тела способствовало повышению оплодотворяемости на 14 % по сравнению с контролем и увеличило активность глутатионпероксидазы в крови после осеменения [4].

Дополнительное введение коровам кобальта и магния усиливает положительное влияние меди на их репродуктивную функцию [19, 23].

В опытах по трансплантации эмбрионов было установлено, что внутримышечное введение телкам за 17 дней до синхронизации эструса смеси хелатных соединений меди, цинка, марганца и селена не оказало положительного влияния на синхронизацию эструса, но улучшило выживаемость трансплантированных эмбрионов в опытной группе по сравнению с контролем [30]. Подкормка коров смесью меди, цинка, марганца и кобальта в сухостойный период способствовала сокращению продолжительности сервис-периода и увеличению результативности осеменения [14, 35].

Хотя роль меди в репродуктивной функции самцов изучена в меньшей степени, чем у самок, имеются данные, что этот микроэлемент участвует в регуляции синтеза АТФ и подвижности сперматозоидов [32]. Положительное влияние этого комплексного соединения меди на подвижность половых клеток и оплодотворяемость коров было отмечено при его добавлении в состав замораживающей среды для спермы быков [6]. По данным ряда других исследователей, отмечается положительная корреляция между повышенной концентрацией меди в крови и более высокой подвижностью сперматозоидов [18, 22]. Имеются данные, что у быков при гипокупремии нарушаются сперматогенез и развитие сперматогенного эпителия в семенниках, снижаются биологическая полноценность половых клеток и либидо [26]. Недостаточное содержание меди в организме самцов может изменять активность различных ферментных систем, которые участвуют в антиоксидантной защите и синтезе АТФ в половых клетках, что может оказывать негативное влияние на сперматогенез и синтез мужских половых гормонов в семенниках.

Как известно, минеральные вещества, в том числе и медь, возможно давать животным в виде минеральных премиксов, брикетов, в виде паст или болюсов. Разработка хелатных форм меди открывает новые возможности в обеспечении животных этим микроэлементом — путем использования инъекционных форм.

В литературе приводятся неоднозначные мнения относительно вопроса более высокой усвояемости меди из органических соединений. По некоторым данным, медь в виде соединения с аминокислотой лизином усваивалась у телят лучше, чем из сульфата меди. Лучшее усвоение меди молочными коровами также отмечалось из хелатных соединений с аминокислотами [12]. По данным других исследователей, не было выявлено различий по усвояемости бычками меди из органических или неорганических соединений [34, 36].

При выявлении обеспеченности животных медью содержание данного микроэлемента в крови и шерстном покрове не может быть надежным индикатором, так как не вся медь циркулирует в крови и ее уровень может в значительной степени зависеть от потребления в рационе антагонистов этого микроэлемента, от уровня продуктивности и состояния здоровья. Например, у коров с низким показателем меди в крови ее содержание в печени было достаточным [27]. Поэтому некоторые исследователи считают, что более надежным индикатором обеспеченности организма медью является содержание данного микроэлемента в печени животных [21]. Тем не менее гораздо чаще используют определение содержания меди в крови животных в связи с простотой и информативностью данной методики [10, 11, 25, 33]. Согласно современным данным достаточным уровнем меди в цельной крови крупного рогатого скота является 0,6–0,9 мг Си/л, а у овец и коз — 0,8–1,5 мг Си/л плазмы крови и 25–100 мг Си/кг сухого вещества печени [9, 27, 25].

Заключение

Таким образом, вопрос о роли меди в регуляции репродуктивной функции у самок и самцов сельскохозяйственных животных не вызывает сомнений. В связи с этим особого внимания требуют нормирование рациона животных по этому микроэлементу и своевременная профилактика проявления признаков гипокупремии.

Кроме того, остается актуальным продолжение дальнейших углубленных исследований влияния меди на репродуктивную функцию различных видов сельскохозяйственных животных.

Статья подготовлена в рамках научно-исследовательской работы, проводимой ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ по государственному заданию № 075-01394-20-02 на 2020 г. Министерства образования и науки РФ в сфере экспертизы по проекту 730000Ф.99.1.БВ15АА00003.

Список литературы

1. Аболиныш А.Ф. Влияние различных источников меди и цинка на концентрацию меди и функцию воспроизводства у лактирующих коров // Бюл. ВНИИФБиП с.-х. животных. Боровск, 1990. Вып. 1. С. 45–47.
2. Данилов Н.А., Бояхчан Г.А., Костандян Г.М., Манвелян С.С. Микроэлементы и воспроизводительная функция у коров. Ветеринария. 1977. № 2. С. 66–68.
3. Ежегодники по племенной работе в молочном скотоводстве в хозяйствах Российской Федерации. М.: ВНИИплем, 2013, 2017–2019.
4. Ерохин А.С., Григошина М.В. Повышение оплодотворяемости коров инъекциями комплексоната меди // Зоотехния. 2000. № 3. С. 27–29.
5. Ерохин А.С., Боев В.И., Киселева М.Г. Основы физиологии: учебник. М.: Инфра-М, 2015. 320 с.
6. Жильцова Л.С., Ерохин А.С., Ларкин С.Н. Замораживание спермы быка в средах с комплексонатами металлов // Доклады Российской академии с.-х. наук. 1985. № 1. С. 30–35.
7. Кальницкий Б.Д., Кузнецов С.Г., Харитонов О.В. Рекомендации по минеральному питанию телок, нетелей, коров // Зоотехния. 1991. № 9. С. 29–33.
8. Калимуллин Ю.Н. Использование синтетических металлохелатов для стимуляции продуктивности и воспроизводительной функции животных: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Дубровицы, 1991.
9. Кузнецов С.Г. Биохимические критерии обеспеченности животных минеральными веществами // Сельскохозяйственная биология. 1991. № 2. С. 16–33.
10. Кузнецов С.Г. Совершенствование системы минерального питания коров молочного направления продуктивности // Сельскохозяйственная биология. 1996. № 6. С. 12–34.
11. Лабинов В.В. Резервы повышения экономической эффективности молочного животноводства // FARM ANIMALS/экономика. 2014. № 2 (6). С. 24–29.
12. Ashmead H.D., Samford R. Effects of metal amino acid chelates or inorganic minerals on three successive lactation in dairy cows. Int. J. Applied Research Vet.Med., 2004, 2: 181–188.
13. Ahmed W.M., Khadrawy H.H., Hanafi E.M., Hameed A., Sabra H.A. Effect of copper deficiency on ovarian activity in Egyptian buffalo-cows. World J. Zoology, 2009, 4: 1–8.
14. Ballantine H.T., Socha M.T., Tomlinson D.J., Jonson A.B., Fielding A.S., Shearer J.K. Effect of feeding complexed zinc, manganese, copper and cobalt to late gestation and lactating dairy cows on claw integrity, reproduction and lactation performance. Prof. Anim. Sci., 2002, 18: 211–218.
15. Corah L.R., Ives S. The effects of essential trace minerals on reproduction in beef cattle. Vet. Clin. Nort. Am.: Food Animal Pract., 1991, 7: 40–57.
16. Dargatz D.A., Garry F.B., Clark G.B., Ross P.F. Serum copper concentration in beef cows and heifers. J. Amer. Vet. Med. Assoc., 1999, 215: 1828–1832.
17. Dominguez-Vara I.A., Huerta-Bravo M. Concentracion e interrelacion mineral en suelo, forraje y suero de ovinos durante dos epocas en el valle de Toluca, Mexico. Agrociencia, 2008, 42: 173–183.
18. Eghbali M., Alavi-Shoushtari S.M., Asri-Rezaei S. Effect of copper and superoxide dismutase content of seminal plasma on buffalo semen characteristics. Pakistan J. of Biological Sciences, 2008, 11: 1964–1968.
19. Harley W.L., Doane R.M. Recent developments in the roles of vitamins and minerals in reproduction. J. Dairy Sci., 1989, 72: 784–804.
20. Hidiroglow M. Trace element deficiencies and fertility in ruminants: A review. J. Dairy Sci., 1979, 62: 1195–1206.
21. Humann-Ziehank E., Ganter M., Hennig-Pauka I., Binder A. Trace mineral status and liver and blood parameters in sheep without mineral supply compared to local roe deer (Capreolus capreolus) population. Small Rum. Research, 2008, 75: 185–191.

22. Jockenhovel F., Bals-Pratsch M., Bertram H.P., Nieschlag E. Seminal lead and copper in fertile and infertile men. *Andrologia*, 1990, 22: 503–511.
23. Kamphues J. Fruchtbarkeitsstörungen im Milchviehbestand infolge einer nichtbedarfsgerechten Mengen- und Spurenelementversorgung. *Übersichten zur Tierernährung*, 1990, 18: 165–176.
24. Kendall N.R., Masters P., Guo L., Scaramuzzi R.J., Campbell B.K. Effect of copper and thiomolybdates on bovine theca cell differentiation in vitro. *J. Endocrinol.*, 2006, 189: 455–463.
25. Kincaid R.L. Assessment of trace mineral status of ruminant: A review. *J. Anim. Sci.*, 2000, 77: 1–10.
26. Kreplin C., Yaremcio B. Effects of nutrition on beef cow reproduction. *Agdex*, 1992, 420/51–1.
27. Mulryan G., Mason F. Assessment of liver copper status in cattle from plasma copper and plasma copper enzymes. *Ann. Rech. Vet.*, 1992, 23: 233–238.
28. Pavlata L., Podhorsky A., Pechova A., Chomat P. Differences in the occurrence of selenium, copper and zinc deficiencies in dairy cows, calves, heifers and bulls. *Vet. Med.-Czech*, 2005, 50: 390–400.
29. Sakhaee E., Kazeminia S. Relationship between liver and blood plasma copper level and abortion in cattle. *Comparative Clinical Pathology*, 2011, 20: 467.
30. Sales J.N.S., Pereira R.V., Bicalho R.C., Baruselli P.S. Effect of injectable copper, selenium, zinc and manganese on the pregnancy rate of crossbred heifers (*Bos indicus* x *Bos taurus*) synchronized for timed embryo transfer. *Livest. Sci.*, 2011, 142: 59–62.
31. Sharma M.C., Joshi C., Pathak N.N., Kaur H. Copper status and enzyme, hormone, vitamin and immune function in heifers. *Res. Vet. Sci.*, 2005, 79: 113–123.
32. Slivkova J., Popenkova M., Massanyi P., et al. Concentration of trace elements in human semen and relation to spermatozoa quality. *J. Environ. Sci. Health a Tox. Hazard Subst. Environ. Eng.*, 2009, 44: 370–375.
33. Tessman R.K., Lakritz J., Tyler J.W., et al. Sensitivity and specificity of serum copper determination for detection of copper deficiency in feeder calves. *J. Am. Vet. Med. Assoc.*, 2001, 218: 756–760.
34. Ward J.D., Spears J.W., Kegley E.B. Effect of trace mineral source on mineral metabolism, performance and immune response in stressed cattle. *J. Anim. Sci.*, 1992, 70 (1): 642.
35. Wilde D. Influence of macro and micro minerals in the peri-parturient period on fertility in dairy cattle. *Anim. Reprod. Sci.*, 2006, 96: 240–249.
36. Wittenberg K.M., Boila R.J., Shariff M.A. Comparison of copper sulfate and copper proteinate as copper sources for copper-depleted steers fed high molybdenum diets. *Can. J. Anim. Sci.*, 1990, 70: 895–904.

References

1. Abolinsh A.F. (1990) *Vliyanie razlichnykh istochnikov medi i tsinka na kontsentratsiyu medi i funktsiyu vosпроизводства u laktiruyushchikh korov* [Influence of various sources of copper and zinc on copper concentration and reproduction function in lactating cows] *Byul. VNIIFBiP s.-kh. zhivotnykh* [Byul. VNIIFBiP farm animals]. Borovsk. Issue. 1. P. 45–47.
2. Danilov N.A., Boyakhchyan G.A., Kostandyan G.M., Manvelyan S.S. (1977) *Mikroelementy i vosпроизvoditel'naya funktsiya u korov* [Trace elements and reproductive function in cows] *Veterinariya* [Veterinary medicine]. No. 2. P. 66–68.
3. *Ezhegodniki po plemennoy rabote v molochnom skotovodstve v khozyaystvakh Rossiyskoy Federatsii* [Yearbooks on pedigree work in dairy cattle breeding on the farms of the Russian Federation (2013)] *VNIIPlem* [VNIIPlem]. Moscow. P. 2017–2019.
4. Erokhin A.S., Grigoshina M.V. (2000) *Povyshenie oplodotvoryaemosti korov in"ektsiyami kompleksonata medi* [Increasing the fertility of cows by injections of copper complexonate] *Zootekhnika* [Animal husbandry]. No. 3. P. 27–29.
5. Erokhin A.S., Boev V.I., Kiseleva M.G. (2015) *Osnovy fiziologii: uchebnik* [Fundamentals of physiology: textbook] *Infra-M* [Infra-M]. Moscow. P. 320.
6. Zhiltsova L.S., Erokhin A.S., Larkin S.N. (1985) *Zamorazhivanie spermy byka v sredakh s kompleksonatami metallov* [Freezing of bull semen in environments with metal complexonates] *Doklady Rossiyskoy akademii s.-kh. nauk* [Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences]. No. 1. P. 30–35.

7. Kalnitskiy B.D., Kuznetsov S.G., Kharitonova O.V. (1991) *Rekomendatsii po mineral'nomu pitaniyu telok, neteley, korov* [Recommendations for the mineral nutrition of heifers and cows] *Zootekhnika* [Animal husbandry]. No. 9. P. 29–33.
8. Kalimullin Yu.N. (1991) *Ispol'zovanie sinteticheskikh metallokhelatov dlya stimulyatsii produktivnosti i vosproizvodi-tel'noy funktsii zhivotnykh: avtoref. dis. kand. biol. nauk. Dubrovitsy* [The use of synthetic metal chelates to stimulate the productivity and reproductive function of animals: author thesis for Degree of Doctor of Biology]. Dubrovitsy.
9. Kuznetsov S.G. (1991) *Biokhimicheskie kriterii obespechennosti zhivotnykh mineral'nymi veshchestvami* [Biochemical criteria for the provision of animals with mineral substances] *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* [Agricultural biology]. No. 2. P. 16–33.
10. Kuznetsov S.G. (1996) *Sovershenstvovanie sistemy mineral'nogo pitaniya korov molochnogo napravleniya produktivnosti* [Improvement of the system of mineral nutrition of dairy cows in the direction of productivity] *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* [Agricultural biology]. No. 6. P. 12–34.
11. Labinov V.V. (2014) *Rezervy povysheniya ekonomicheskoy effektivnosti molochnogo zhivotnovodstva* [Reserves of increasing the economic efficiency of dairy farming] *FARM ANIMALS ekonomika* [FARM ANIMALS. Economics]. No. 2 (6). P. 24–29.
12. Ashmead H.D., Samford R. (2004) Effects of metal amino acid chelates or inorganic minerals on three successive lactation in dairy cows. *Int. J. Applied Research Vet. Med.* P. 181–188.
13. Ahmed W.M., Khadrawy H.H., Hanafi E.M., Hameed A., Sabra H.A. (2009) Effect of copper deficiency on ovarian activity in Egyptian buffalo-cows. *World J. Zoology.* 4: 1–8.
14. Ballantine H.T., Socha M.T., Tomlinson D.J., Jonson A.B., Fielding A.S., Shearer J.K. (2002) Effect of feeding complexed zinc, manganese, copper and cobalt to late gestation and lactating dairy cows on claw integrity, reproduction and lactation performance. *Prof. Anim. Sci.* 18: 211–218.
15. Corah L.R., Ives S. (1991) The effects of essential trace minerals on reproduction in beef cattle. *Vet. Clin. Nort. Am.: Food Animal Pract.* 7: 40–57.
16. Dargatz D.A., Garry F.B., Clark G.B., Ross P.F. (1999) Serum copper concentration in beef cows and heifers. *J. Amer. Vet. Med. Assoc.* 215: 1828–1832.
17. Dominguez-Vara I.A., Huerta-Bravo M. (2008) Concentracion e interrelacion mineral en suelo, forraje y suero de ovinos durante dos epocas en el valle de Toluca, Mexico. *Agrociencia.* 42: 173–183.
18. Eghbali M., Alavi-Shoushtari S.M., Asri-Rezaei S. (2008) Effect of copper and superoxide dismutase content of seminal plasma on buffalo semen characteristics. *Pakistan J. of Biological Sciences.* 11: 1964–1968.
19. Harley W.L., Doane R.M. (1989) Recent developments in the roles of vitamins and minerals in reproduction. *J. Dairy Sci.* 72: 784–804.
20. Hidioglow M. (1979) Trace element deficiencies and fertility in ruminants: A review. *J. Dairy Sci.* 62: 1195–1206.
21. Humann-Ziehank E., Ganter M., Hennig-Pauka I., Binder A. (2008) Trace mineral status and liver and blood parameters in sheep without mineral supply compared to local roe deer (*Capreolus capreolus*) population. *Small Rum. Research.* 75: 185–191.
22. Jockenhovel F., Bals-Pratsch M., Bertram H.P., Nieschlag E. (1990) Seminal lead and copper in fertile and infertile men. *Andrologia.* 22: 503–511.
23. Kamphues J. (1990) Fruchtbarkeitsstorungen im Milchviehbestand infolge einer nichtbedarfsgerechten Mengen- und Spurenelementversorgung. *Ubersichten zur Tierernahrung.* 18: 165–176.
24. Kendall N.R., Masters P., Guo L., Scaramuzzi R.J., Campbell B.K. (2006) Effect of copper and thiomolybdates on bovine theca cell differentiation in vitro. *J. Endocrinol.* 89: 455–463.
25. Kincaid R.L. (2000) Assessment of trace mineral status of ruminant: A review. *J. Anim. Sci.* 77: 1–10.
26. Kreplin C., Yaremicio B. (1992) Effects of nutrition on beef cow reproduction. *Agdex.* 420/51–1.
27. Mulryan G., Mason F. (1992) Assessment of liver copper status in cattle from plasma copper and plasma copper enzymes. *Ann. Rech. Vet.* 23: 233–238.
28. Pavlata L., Podhorsky A., Pechova A., Chomat P. (2005) Differences in the occurrence of selenium, copper and zinc deficiencies in dairy cows, calves, heifers and bulls. *Vet. Med.-Czech.* 50: 390–400.

29. Sakhaee E., Kazeminia S. (2011) Relationship between liver and blood plasma copper level and abortion in cattle. *Comparative Clinical Pathology*. 20: 467.
30. Sales J.N.S., Pereira R.V., Bicalho R.C., Baruselli P.S. (2011) Effect of injectable copper, selenium, zinc and manganese on the pregnancy rate of crossbred heifers (*Bos indicus* x *Bos taurus*) synchronized for timed embryo transfer. *Livest. Sci.* 142: 59–62.
31. Sharma M.C., Joshi C., Pathak N.N., Kaur H. (2005) Copper status and enzyme, hormone, vitamin and immune function in heifers. *Res. Vet. Sci.* 79: 113–123.
32. Slivkova J., Popenkova M., Massanyi P., et al. (2009) Concentration of trace elements in human semen and relation to spermatozoa quality. *J. Environ. Sci. Health a Tox. Hazard Subst. Environ. Eng.* 44: 370–375.
33. Tessman R.K., Lakritz J., Tyler J.W., et al. (2001) Sensitivity and specificity of serum copper determination for detection of copper deficiency in feeder calves. *J. Am. Vet. Med. Assoc.* 218: 756–760.
34. Ward J.D., Spears J.W., Kegley E.B. (1992) Effect of trace mineral source on mineral metabolism, performance and immune response in stressed cattle. *J. Anim. Sci.* 70 (1): 642.
35. Wilde D. (2006) Influence of macro and micro minerals in the peri-parturient period on fertility in dairy cattle. *Anim. Reprod. Sci.* 96: 240–249.
36. Wittenberg K.M., Boila R.J., Shariff M.A. (1990) Comparison of copper sulfate and copper proteinate as copper sources for copper-depleted steers fed high molybdenum diets. *Can. J. Anim. Sci.* 70: 895–904.

НАЦИОНАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

DOI 10.35264/1996-2274-2020-2-178-187

О РЕГУЛИРОВАНИИ РАЗМЕЩЕНИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ, ПОДПАДАЮЩЕЙ ПОД ЭКСПОРТНЫЙ КОНТРОЛЬ, В ОТКРЫТОМ ДОСТУПЕ

А.Б. Логунов, директор центра ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. воен. наук, ст. науч. сотр., logunov@extech.ru

Д.В. Ольшевский, нач. отдела ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, olsh@extech.ru

А.В. Гренчихин, зам. нач. отдела ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, agseaman@extech.ru

Рецензент: А.И. Гаврюшин

В статье дается оценка опыта ведущих зарубежных стран по регулированию размещения (опубликования) результатов научно-технической деятельности в открытом доступе и наличию законодательно установленных ограничений на их распространение с точки зрения защиты своего научно-технического и промышленного потенциала, в том числе с позиции экспортного контроля.

Ключевые слова: фундаментальные исследования, открытый доступ, результаты интеллектуальной деятельности, национальная безопасность, сохранение государственной тайны, экспортный контроль, государственное регулирование.

ON REGULATION OF THE PLACEMENT OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL INFORMATION SUBJECT TO EXPORT CONTROL IN OPEN ACCESS

A.B. Logunov, Director of Centre, SRI FRCEC, Doctor of Military Sciences, Senior Researcher, logunov@extech.ru

D.V. Olshevsky, Head of Department, SRI FRCEC, olsh@extech.ru

A.V. Grenchikhin, Deputy Head of Department, SRI FRCEC, agseaman@extech.ru

The article provides an assessment of the experience of leading foreign countries in regulating the placement (publication) of the results of scientific and technological activities in the public domain and the presence of legally established restrictions on their distribution in terms of protecting their scientific, technological and industrial potential, including from the standpoint of export control.

Keywords: fundamental research, open access, results of intellectual activity, national security, preservation of state secrets, export control, state regulation.

В настоящее время область деятельности, связанная с размещением результатов научной деятельности в периодических изданиях, практически полностью монополизирована. При этом крупные издательские компании приобретают права на опубликование всех высокоимпактных журналов и существенно поднимают цены на них. Таким образом, доступ к новым достижениям науки становится в некотором смысле ограниченным. И вопросы реального свободного доступа на текущий момент остаются нерешенными. В то же время обеспечение доступности и открытости научного знания потребовало уточнения самого понятия и его со-

держания. Термин «открытый доступ» впервые был упомянут на Будапештской конференции по открытому доступу (Budapest Open Access Initiative [URL: www.budapestopen-accessinitiative.org (дата обращения: 12.11.2020)] в феврале 2002 г. С тех пор его смысл практически не изменился: Open Access определяется как бесплатный (free), оперативный (immediate), постоянный (permanent), полнотекстовый (fulltext), онлайн-овый (online) доступ к научным публикациям [1].

Открытый доступ, реализуемый с помощью репозитариев и журналов свободного доступа, позволяет резко увеличить видимость и цитируемость публикаций ученых и их коллективов. Научно-исследовательские организации, которые создают такие репозитарии и журналы, а также принимают институциональные мандаты открытого доступа, получают значительные конкурентные преимущества. В то же время в рамках широкого взгляда на проблему открытого доступа существуют вопросы сохранения государственной тайны, поскольку большая часть исследований финансируется государством, и их результаты по-прежнему могут входить в поле зрения сферы обеспечения национальной безопасности и обороны, в том числе и экспортного контроля. Особый интерес здесь представляет тот опыт, который реализуется ведущими научными державами в отношении фундаментальных исследований и новых научных областей.

Вопросы регулирования открытого доступа и экспортный контроль в США

Политика США в области обеспечения национальной безопасности при передаче научно-технической и инженерной информации определяется документом 1985 г. Это базовый подзаконный акт — Директива в области национальной безопасности от 21.09.1985 № 189 «Национальная политика в области передачи научно-технической и инженерной информации» [3]. Директива NSDD-189 определяет национальную политику контроля научной, научно-технической и инженерной информации, произведенной в ходе финансируемых федеральным правительством фундаментальных исследований в колледжах, университетах и лабораториях.

Для Министерства обороны США как основного федерального заказчика НИОКТР сделаны соответствующие подтверждения и уточнения NSDD-189, которые изложены в Меморандуме Министерства обороны о политике в области охраны исключений для фундаментальных исследований (май 2010 г.) [4].

Директива NSDD-189 определяет фундаментальные исследования как «фундаментальные и прикладные исследования в области науки и техники, результаты которых обычно публикуются и широко распространяются в научном сообществе, в отличие от проприетарных исследований и/или не являющегося свободным программного обеспечения (ПО), дизайна и т.д., результаты которых, как правило, имеют ограничения доступа по причине частной собственности или наличия иного правообладателя или по соображениям национальной безопасности».

Политика американской администрации заключается в том, чтобы, насколько возможно, результаты фундаментальных исследований оставались без ограничений доступа. При этом в отношении финансируемых федеральным правительством фундаментальных исследований в области науки, техники и технологий могут быть применены меры по засекречиванию в интересах национальной безопасности. При этом каждый федеральный государственный орган несет ответственность:

а) за определение целесообразности засекречивания научно-исследовательских работ (НИР) до присуждения исследовательского гранта, заключения контракта или соглашения о сотрудничестве и, если да, контроль над присвоением грифа секретности для результатов интеллектуальной деятельности (РИД) через стандартные процедуры;

б) за периодическую проверку исследовательских грантов, контрактов или соглашений о сотрудничестве с точки зрения необходимости засекречивания. При этом ограничения (присвоение грифа секретности) могут быть наложены на процесс поведения НИР или отчетность по ней, если они финансируются федеральным правительством и не получили

ранее соответствующего грифа секретности, за исключением случаев, предусмотренных в законодательстве США [3].

В дополнение к NSDD-189 Меморандум Министерства обороны США от 24.05.2010 по вопросу фундаментальных исследований уточняет, что Министерство обороны не ограничивает раскрытие результатов фундаментальных исследований, как определено в этом Меморандуме, если только такие исследования не засекречиваются по соображениям национальной безопасности или если иное не требуется в соответствии с федеральными законами, положениями или исполнительными директивами/приказами [4].

Меморандум в соответствии с NSDD-189 ввел определение: «Фундаментальные исследования по контракту». К ним стали относиться исследования, проводимые в рамках грантов и контрактов, которые (а) финансируются из бюджета категории 6.1 («Исследования»), независимо от того, проводятся ли они университетами или промышленностью, или (б) финансируются за счет бюджета категории 6.2 («Поисковая разработка») и проводятся на территории университетов (университетских городков). Исследование не относится к категории «фундаментальных» в тех редких и исключительных случаях, когда финансируемые на основе 6.2 работы связаны с высокой вероятностью раскрытия эксплуатационных характеристик военных систем или производственных технологий, которые являются уникальными и имеют решающее значение для обороны, и когда соглашение об ограничениях было зарегистрировано в контракте или гранте.

Меморандум также отмечает, что в настоящее время (2010 г.) термины «бюджетная категория 6.1» («Исследования») и «бюджетная категория 6.2» («Поисковая разработка») были заменены на: «бюджетная деятельность по исследованиям, разработкам, испытаниям и оценкам 1- (базовые исследования) и 2- (прикладные исследования)». С учетом этих уточнений вознаграждения (оплата/финансирование) Министерства обороны США за проведение контрактных фундаментальных исследований не распространяются на РИД, включающие секретные изделия, информацию или технологии (кроме исключительных обстоятельств). При этом фундаментальные исследования должны исполняться таким образом, чтобы они не попадали под соответствующие «закрывающие» положения законодательства США, включая законы и правила США по экспортному контролю. Контрактные фундаментальные исследования также не должны осуществляться таким образом, чтобы на их проведение распространялись ограничения на привлечение иностранных исследователей или ограничения на публикацию.

Также одним из направлений ограничения распространения научно-исследовательской информации, в том числе касающейся результатов фундаментальных исследований, является установление категории «Контролируемая несекретная информация (CUI)» в Меморандуме, выпущенном Администрацией Президента Дж. Буша-мл. 09.05.2008, через семь лет после письма советника по национальной безопасности К. Райс, подтверждающего NSDD-189 [2].

Меморандум 2008 г. был заменен Указом № 13556, который сохранил обозначение «Контролируемая несекретная информация» для федерального использования, но предписал минимизировать ее использование [5].

Важно отметить, что в Реестре CUI нет подразделения или категории, непосредственно связанной с проведением научных исследований, что соответствует принципам, изложенным в NSDD-189. Однако две категории экспортного контроля, а именно: «Экспортный контроль» и «Экспортно-контролируемые исследования», из категорий CUI очень расплывчаты. Например, «Экспортно-контролируемые исследования» — это исследования, «связанные с систематическим исследованием и изучением материалов и источников с целью установления фактов и получения новых выводов».

Отмечается, что Национальный научный фонд США (ННФ) должен поддержать принципы NSDD-189, которые ясно дают понять, что фундаментальные исследования должны

оставаться неограниченными в максимально возможной степени и ННФ должен препятствовать использованию новых определений CUI в качестве механизма для установления границ промежуточного уровня вокруг областей фундаментальных исследований.

Указом Президента США Б. Обамы от 09.11.2010 № 13558 был создан Координационный центр экспортного контроля (Export Enforcement Coordination Center), который должен был свести воедино деятельность разрозненных подразделений различных министерств (Государственный департамент, министерства юстиции, внутренней безопасности, финансов, торговли, энергетики, Комиссия по ядерной энергии). Координационный центр возглавил представитель Министерства внутренней безопасности, двумя заместителями которого стали сотрудники министерств торговли и юстиции. Центр начал свою работу 07.03.2012.

В 2018 г. президент США Д. Трамп подписал Закон о реформе экспортного контроля. Вашингтон стал придерживаться новой политики ограничений в отношении китайских инвестиций в американские высокотехнологичные компании. Ответственным за реализацию реформы экспортного контроля стало Бюро промышленности и безопасности министерства торговли (табл. 1). При этом одна из основных идей данного закона заключается в том, что экспортные ограничения будут применяться не только в отношении оборудования или программного обеспечения, поставляемого за границу, но и в отношении людей и идей.

Таблица 1

Нормативные акты США в области экспортного контроля

Нормативный акт	Исполнительный государственный орган	Регулирующие документы
Закон «О контроле за экспортом оружия» (Arms Export Control Act)	Государственный департамент, управление (директорат) контроля торговли продукцией оборонного назначения Госдепартамента (State Department Directorate of Defense Trade Controls-DDTC)	Международные правила торговли оружием (ИТАР) (International Traffic in Arms Regulations 22 CFR Parts) (120–130 Lists to Look for)
Закон «Об административном регулировании экспорта» (Export Administration Act Regulations: EAR (Export Administration Regulations) (Титул 15 CFR части 700–799)	Министерство торговли, Бюро промышленности и безопасности (Commerce Department Bureau of Industry and Security)	Правила администрирования экспорта (EAR)
Закон «Торговля с врагом действует» (Trading with the Enemy Act)	Министерство финансов США, Управление по контролю за иностранными активами (Treasury Department Office of Foreign Assets Control-OFAC)	Regulations OFAC
Закон «О реорганизации энергетики»	Комиссия по ядерной энергии	10 CFR 810
Закон «Об атомной энергии»	Министерство энергетики	10 CFR 810
Исполнительный приказ № 12829; Национальная программа промышленной безопасности	Министерство обороны	Национальная программа промышленной безопасности (защита секретной информации, предоставляемой подрядчикам, лицензиатам и получателям грантов правительства США)

В то же время критике со стороны научного сообщества и специалистов по разработке (ПО) подверглись новые списки экспортного контроля США (после реформы 2018 г.) по целому ряду новых технологий. Этот список включает искусственный интеллект и машинное обучение, а также сопутствующие технологии в области робототехники, интерфейсов «мозг — компьютер», микропроцессорной техники и квантовых вычислений. При этом отмечается отсутствие критериев разграничения алгоритмов (которые носят открытый характер и могут размещаться в открытом доступе депозитариев, например arXiv и GitHub, и подпадают под «исключение фундаментальных исследований») и систем (т.е. практически реализованных и имеющих практические приложения изделий, которые могут иметь по крайней мере «двойное назначение»).

Открытый доступ

Общую фабулу подхода в США к этому вопросу можно выразить преамбулой Массачусетского технологического института (МИТ) к вкладке «Экспортный контроль» на сайте [URL: <https://research.mit.edu/integrity-and-compliance/export-control> (дата обращения: 12.11.2020)]: «Защита открытой исследовательской политики и свободного обмена информацией между учеными при соблюдении законодательства США об экспортном контроле». Так, любой университет/научно-исследовательская организация (НИО) США декларирует приверженность открытости в исследованиях — свободе доступа всех заинтересованных лиц к базовым данным, процессам и конечным результатам исследований. РИД открыто публикуются. Открытость предполагает отказ от проведения закрытых исследований (результаты которых не могут быть опубликованы без предварительного одобрения заказчика) на исследовательских мощностях университетов/НИО. Открытость также требует, чтобы никакие ограничения участия в научных исследованиях не основывались «на стране происхождения» или гражданстве. Любые исключения из этого правила должны быть одобрены соответствующими должностными лицами администрации университета/НИО в зависимости от обстоятельств.

Экспортный контроль для исследовательских организаций и университетов в США осуществляется в отношении следующих направлений деятельности:

- проведения научных исследований;
- выступлений на международных конференциях;
- участия в международном сотрудничестве или партнерстве (международные коллаборации);
- преподавания курсов за рубежом или онлайн;
- выезда ученого/специалиста за пределы США;
- передачи технических данных или технологий лицам, не являющимся гражданами США;
- поставки товаров, ПО или информации за рубеж;
- покупки и оплаты кому-либо в другой стране за товары, услуги или для возмещения расходов.

Исключения (по доступу, распространению и экспортному контролю) для информации, которая является общедоступной или находится в открытом доступе

Данные исключения применяются только к информации и, в некоторых случаях, к программному обеспечению, связанному с исследованием. Эти исключения не применяются к оборудованию, статьям, службам или программному обеспечению для шифрования.

Исключения «применяются, если информация находится в общественном достоянии и в целом доступна для общественности посредством неограниченного распространения» (том Свода федеральных нормативных актов США — 15 CFR 734.3 (b); том Свода федеральных нормативных актов США — 22 CFR § 120.11 ITAR). Публичная информация (регулирование Правил международной торговли оружием США (ITAR — International Traffic in Arms Regulations)) и общедоступная информация и программное обеспечение (регулирование

Правил экспортного администрирования США (EAR – the Export Administration Regulations)) публикуются и доступны для общественности:

- через публикации в периодических изданиях, книгах, печатных, электронных или любых других СМИ, доступных для общего распространения;
- подписки, которые доступны без ограничений любому лицу, желающему получить или приобрести опубликованную информацию;
- веб-сайты, доступные для общественности бесплатно или по стоимости, которая не превышает стоимость воспроизведения или распространения;
- библиотеки, открытые для широкой публики, включая большинство университетских библиотек;
- патенты и открытые (опубликованные) патентные заявки;
- выступления на открытой конференции, совещании, семинаре, выставке или другом открытом собрании в США (ITAR) или в любом другом месте (EAR), которое обычно доступно общественности за плату, разумно связанную с ценой, и где участники могут делать заметки и уходить с заметками;
- фундаментальные исследования;
- образовательную информацию (преподавание).

Схемы регулирования экспортного контроля в США признают важность проведения открытых фундаментальных исследований в университетах и НИО. Фундаментальные и прикладные исследования в области науки и техники проводятся на территории кампусов и лабораторий, в результате чего информация, как правило, публикуемая и широко распространяемая в рамках научного сообщества, обычно считается «фундаментальными исследованиями» и исключается из требований экспортной лицензии. В целом результаты фундаментальных исследований являются «общественным достоянием» в рамках ITAR и в соответствии с положениями, касающимися «общедоступных технологий», «опубликованной информации и программного обеспечения», «информации, полученной в результате фундаментальных исследований» и «образовательной информации».

«Исключение фундаментальных исследований» для университетов не распространяется на профессорско-преподавательский состав или студентов, выполняющих научные исследования в компаниях, включая компании, которые лицензируют университетские технологии. «Исключение фундаментальных исследований» распространяется только на студенческий городок.

Для того чтобы считаться «фундаментальным», исследование не может подлежать ограничениям на публикацию информации, полученной в результате исследования, и не может исключать участие иностранных граждан. Если университет или исследователь принимает более широкие ограничения на публикацию результатов, будь то формально (например, в спонсируемом исследовательском соглашении) или неофициально (например, в соглашении «рукопожатие»), или согласился принять конкретные меры контроля национальной безопасности, то «исключение фундаментальных исследований» не будет применяться.

Закрывание материалов исследования (ограничение доступа к работам) допускается в индивидуальном порядке, когда это имеет решающее значение для исследования. Использование закрытых материалов для исследований предваряется запросом на исключение из Открытой политики НИО и разработкой и утверждением подробного практико-ориентированного и эффективного плана технологического контроля (ТСР). Запрос и план подготавливаются научным руководителем/ответственным исполнителем совместно с сотрудником/ответственным НИО по экспортному контролю. При этом закрытый статус исследовательского проекта ежегодно пересматривается Организацией по экспортному контролю НИО.

Вместе с тем существует понятие «Исключение преподавания», подразумевающее возможность раскрывать образовательную информацию, которая выпускается преподаванием на курсах, указанных в университетском каталоге, и в связанных с ними учебных лаборато-

риях академических учреждений (EAR 15 CFR § 734.9), или информацию, касающуюся общенаучных, математических или инженерных принципов, обычно преподаваемых в школах, колледжах и университетах (ITAR 120.10 (a) [5]).

При этом для квалификации исследования как фундаментального и подпадающего под «исключение фундаментальных исследований»/«исключение «преподавания» университет или НИО назначает должностное лицо в своей администрации, ответственное за мероприятия в области экспертного контроля. Это должностное лицо обязано принимать меры по контролю за публикациями или ограничению доступа/распространения (например, требования для использования иностранными гражданами), помогать исследователям/преподавателям заключать соглашения о конфиденциальности или неразглашении по реализуемым тематикам исследований.

Основная ответственность за определение возможности допустить РИД к открытой публикации, доступу лежит на исполнителе НИР, который руководствуется при этом специально разработанными на основе действующего законодательства университетом/НИО вопросами — так называемыми «красными флагами», указывающими на необходимость засекречивания, закрытия доступа к исследованиям.

Вопросы регулирования открытого доступа и экспортный контроль в Великобритании

Британская система экспортного контроля, имеющая свои законодательные отличия от американской, полностью дублирует схему, изложенную выше для США, касающуюся открытого доступа к фундаментальным исследованиям (см, напр., [URL: <https://www.sheffield.ac.uk/rs/export>] (дата обращения: 12.11.2020)] [6].

Руководство по законодательству Соединенного Королевства в области экспортного контроля содержит следующие положения для университетов

Закон об экспортном контроле (the Export Control Act 2002) направлен на обеспечение того, чтобы наука и техника Соединенного Королевства не эксплуатировались распространителями оружия массового уничтожения (ОМУ) или террористами.

Экспортный контроль применяется к сотрудникам университетов так же, как и в любой другой организации. Многие товары, технологии или ноу-хау предназначены для гражданских целей, но также могут способствовать созданию оружия массового поражения (ОМУ) и ракет, используемых для его доставки. Одной из основных целей экспортного контроля является предотвращение попадания таких чувствительных технологий в чужие руки.

Основными областями озабоченности являются военные технологии, материалы, оборудование или ноу-хау, которые могут быть использованы в ядерном, химическом или биологическом оружии или взрывных устройствах или средствах доставки и их физическом (осязаемом) или электронном (неосязаемом) экспорте.

Несоблюдение этого законодательства является уголовным преступлением.

В случаях нарушения секретности при проведении научно-исследовательских работ военного назначения на частных предприятиях и разглашения секретных сведений сотрудниками этих предприятий действуют Закон о мерах по предотвращению коррупции 1906 г. и Закон о кражах 1968 г. Основные принципы соблюдения секретности при проведении таких работ военного назначения изложены в инструкциях контрразведывательной службы (МИ-5). В каждом министерстве имеется своя служба безопасности, отвечающая за соблюдение норм и правил режимности указанных работ военного назначения в государственных НИО и частных научных центрах и лабораториях, выполняющих заказы министерства.

Вместе с тем в ноябре 2007 г. была введена Схема проверки студентов ATAS. Она направлена на защиту определенных критических научных исследований, связанных с оружием массового уничтожения и средствами его доставки.

Вопросы регулирования открытого доступа и экспортный контроль в ФРГ

Экспортный контроль в научно-исследовательской деятельности

Основным административным и лицензирующим органом ФРГ в контексте задач Федерального правительства в отношении безопасности и проведения внешнеполитических интересов страны является Федеральное ведомство по экономике и экспортному контролю (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA)). BAFA осуществляет в первую очередь контроль сделок со стратегическими товарами, в особенности с оружием, военной техникой и так называемыми товарами двойного назначения, к которым относятся продукция, программное обеспечение и технологии, используемые как в гражданских, так и в военных целях.

При этом характерна тенденция сближения норм законодательства ФРГ с нормами законодательств стран — членов Европейского союза (ЕС), которые приняли общие обязательства, предусматривающие:

- общую ответственность за нераспространение и контроль товаров, влияющих на безопасность стран ЕС;
- выполнение санкций, вводимых Советом безопасности ООН или другими международными организациями;
- соответствие нормам международного права и национальных решений в области внешней и внутренней политики стран ЕС;
- анализ последствий экспорта определенных товаров на предмет опасности данных сделок для других стран — членов ЕС.

Экспортный контроль в научном секторе ФРГ

Общие правила такого контроля изложены в размещенных на сайте BAFA брошюре «Экспортный контроль в науке и исследованиях» и в справочнике «Руководство по экспортному контролю и научным кругам» [URL: https://www.bafa.de/EN/Foreign_Trade/Export_Control/Export_Control_and_Academia/export_control_academia_node.html;jsessionid=C819C8FDE4F6852528904B6AA253B2C0.1_cid362 (дата обращения: 14.11.2020)]. Публикации были созданы в сотрудничестве с научно-исследовательскими организациями, включая Институт Гельмгольца (Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH), Общество Фраунгофера (Gesellschaft), Институт Лейбница (DSMZ), Институт Роберта Коха и Технический университет Берлина.

Правила, регулирующие экспортный контроль в ФРГ, в равной степени распространяются как на частные лица, такие как ученые (исследователи), так и на юридические лица (научно-исследовательские организации).

Сведения (технологии) об атомном, биологическом или химическом оружии, а также о критических товарах и технологиях двойного назначения, которые предназначены или могут быть использованы для применения или разработки такого оружия, запрещено передавать без ограничений любому получателю в любой стране (даже если эти товары используются в гражданских целях в повседневной жизни).

Списки критических товаров согласуются на международном уровне. Постоянный контроль за этими товарами направлен на предотвращение осуществления прежде всего программ по разработке и созданию оружия массового уничтожения. Для экспорта критических товаров, например в контексте исследовательских проектов или сотрудничества, требуется получение лицензии (выдается BAFA). Это требование (получение лицензии) также распространяется на передачу знаний и, следовательно, на передачу результатов исследований, если они имеют важное значение и потенциально могут быть использованы для разработки, производства или использования товара, включенного в перечень критических товаров.

Чтобы оценить, нужна ли лицензия, ученые (исследователи) и научно-исследовательские организации должны сначала определить, не подпадает ли часть исследований под какой-

либо контроль. Не все товары, программное обеспечение и технологии находятся под контролем. Иногда большая часть исследовательских проектов не затрагивается экспортным контролем, лицензионными требованиями или запретами.

Научные области и направления, на исследования в которых распространяется экспортный контроль:

- биология, включая биотехнологии и медицину;
- химия, биохимия;
- физика;
- ядерные технологии;
- энергетика и технологии охраны окружающей среды;
- телекоммуникационные и информационные технологии;
- электротехника;
- аэрокосмические технологии;
- машиностроение;
- материаловедение;
- технологии производства.

При этом все ученые (исследователи) и научно-исследовательские организации несут ответственность в отношении экспортного контроля. С одной стороны, это касается экспорта товаров (например, лабораторное оборудование, испытательное оборудование), особенно включая экспорт материальных технологий (в электронной почте, на носителях данных, в облаках и т. д.), а с другой стороны — нематериальной передачи знаний или технической поддержки.

Свобода научных исследований

Свобода научных исследований гарантирована основным законом ФРГ (Конституция), а цель экспортного контроля состоит не в том, чтобы подвергать цензуре научные исследования или публикации, а в том, чтобы предотвратить серьезные злоупотребления, связанные с безопасностью, когда критические товары или технологии передаются за границу.

Ученые (исследователи) и научно-исследовательские организации должны соблюдать те же правовые нормы, что и промышленность ФРГ. Когда товары экспортируются, например, путем транспортировки/отправки измерительного оборудования или когда информация передается, например, путем предоставления результатов измерений, необходимо убедиться (провести проверку), требуют ли действия по передаче (любым способом) товаров и технологий предварительного одобрения регулирующих органов.

Вместе с тем, в отличие от экспорта критических товаров, передача технологий имеет свою особенность. Если исследование уже находится в общем доступе или является фундаментальным, а не прикладным, то передача такой информации обычно освобождается от лицензионного требования (получение лицензии). При этом действует понятие «научная свобода», закрепленное в Основном законе ФРГ.

Анализ нормативной базы ведущих зарубежных государств по научно-исследовательской деятельности (США, Великобритания, ФРГ) показывает, что открытый доступ, в том числе к результатам исследований, декларируется основными законами (США и ФРГ) и национальным законодательством данных стран. При этом вопросы сохранения режима государственной тайны, экспортного контроля и т. п. отработаны здесь «классическим» путем (т. е. присвоением соответствующего грифа). Сами процедуры ограничения доступа с помощью присвоения грифа реализуются дискреционно, по усмотрению самих исследователей и подразделений научно-исследовательских организаций, ответственных за соблюдение норм национальных правил по защите государственной тайны и экспортному контролю. Реализация инициативы «Открытый доступ» для США, Великобритании и ФРГ вообще не ставится под сомнение только в отношении фундаментальных исследований, которые априори должны быть открытыми.

В целом процесс размещения (опубликования) результатов научной деятельности в ведущих зарубежных странах схож с правилами, применяемыми в Российской Федерации. Однако в силу быстрых изменений в развитии научно-технического прогресса, связанных с внедрением новых технологий, которые разрабатываются в ходе фундаментальных, поисковых и прикладных исследований, позволяющих существенно повлиять на безопасность и обороноспособность страны, вопрос о правилах опубликования итогов научно-исследовательской деятельности носит важный государственный характер.

Статья выполнена в ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по результатам работ в рамках Государственного задания № 075-01394-20-02.

Список литературы

1. Семячкин Д.А. Открытый доступ к науке: мифы и реальность. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otkrytyy-dostup-k-nauke-mify-i-realnost> (дата обращения: 14.11.2020).
2. Rice Condoleezza. Letter to Dr. Harold Brown. 01 November 2001. URL: <https://fas.org/sgp/bush/cr110101.html> (дата обращения: 14.11.2020).
3. National security decision directive (NSDD-189) National policy on the transfer of scientific, technical and engineering information, September 21, 1985. URL: <https://fas.org/irp/offdocs/nsdd/nsdd-189.htm> (дата обращения: 14.11.2020).
4. DOD Policy Memo on Protection Exemptions for Fundamental Research Memorandum for secretaries of the military departments. 24 May 2010: SUBJECT: Fundamental Research. URL: <https://fas.org/irp/doddir/dod/research.pdf> (дата обращения: 14.11.2020).
5. United States, Executive Office of the President [Barak Obama]. Executive Order 13556: Controlled Unclassified Information. 04 November 2010. National Archives. URL: <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2010/11/04/executive-order-13556-controlled-unclassified-information> (дата обращения: 14.11.2020).
6. Руководство по законодательству об экспортном контроле. URL: <https://www.sheffield.ac.uk/rs/export> (дата обращения: 14.11.2020).

References

1. Semyachkin D.A. Semyachkin D.A. *Otkrytyy dostup k nauke: mify i real'nost'* [Open Access to Science: Myths and Reality]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otkrytyy-dostup-k-nauke-mify-i-realnost> (date of access: 14.11.2020).
2. Rice Condoleezza. (2001) Letter to Dr. Harold Brown. 01 November. Available at: <https://fas.org/sgp/bush/cr110101.html> (date of access: 14.11.2020).
3. National security decision directive (NSDD-189) National policy on the transfer of scientific, technological and engineering information, September 21 (1985). Available at: <https://fas.org/irp/offdocs/nsdd/nsdd-189.htm> (date of access: 14.11.2020).
4. DOD Policy Memo on Protection Exemptions for Fundamental Research Memorandum for secretaries of the military departments. 24 May 2010: SUBJECT: Fundamental Research. Available at: <https://fas.org/irp/doddir/dod/research.pdf> (date of access: 14.11.2020).
5. United States, Executive Office of the President (Barak Obama). Executive Order 13556: Controlled Unclassified Information. 04 November 2010. National Archives. Available at: <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2010/11/04/executive-order-13556-controlled-unclassified-information> (date of access: 14.11.2020).
6. *Rukovodstvo po zakonodatel'stvu ob eksportnom kontrole* [Guide to Export Control Laws]. Available at: <https://www.sheffield.ac.uk/rs/export> (date of access: 14.11.2020).

DOI 10.35264/1996-2274-2020-2-188-195

ОБЗОР ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА СОЗДАНИЯ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВИРУСНЫХ ИНФЕКЦИЙ

А.Б. Логунов, директор Центра ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. воен. наук, ст. науч. сотр., logunov@extech.ru

Д.Б. Изюмов, нач. отдела ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, izyumov@extech.ru

Д.В. Ольшевский, нач. отдела ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, olsh@extech.ru

А.В. Гренчихин, зам. нач. отдела ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, agseaman@extech.ru

Е.Л. Кондратюк, зам. нач. отдела ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, kel@extech.ru

Рецензент: А.И. Гаврюшин

В статье дается обзор актуального опыта отечественных и зарубежных разработок средств мониторинга и контроля распространения вирусных инфекций в общественных местах.

Ключевые слова: вирусные инфекции, биоаэрозоли, мониторинг и контроль, биосенсоры, COVID-19, метод ПЦР.

REVIEW OF DOMESTIC AND FOREIGN EXPERIENCE IN CREATING MEANS TO CONTROL THE SPREAD OF VIRAL INFECTIONS

A.B. Logunov, Director of Centre, SRI FRCEC, Doctor of Military Sciences, Senior Researcher, logunov@extech.ru

D.B. Iziumov, Head of Department, SRI FRCEC, izyumov@extech.ru

D.V. Olshevsky, Head of Department, SRI FRCEC, olsh@extech.ru

A.V. Grenchikhin, Deputy Head of Department, SRI FRCEC, agseaman@extech.ru

E.L. Kondratyuk, Deputy Head of Department, SRI FRCEC, kel@extech.ru

The article provides an overview of the current experience of domestic and foreign developments in monitoring and control of the spread of viral infections in public places.

Keywords: viral infections, bioaerosols, monitoring and control, biosensors, COVID-19, PCR method.

Одной из наиболее острых научно-технических проблем обеспечения биобезопасности и здоровья населения является разработка автоматизированных и автоматических средств контроля вирусов в различных средах, в том числе для систем мониторинга биоугроз (патогенов). Цель построения средств контроля вирусов состоит в том, чтобы с помощью прямого анализа аэрозоля, сточных вод и поверхностных проб выявить возбудителей до момента заражения людей. Техничко-технологические решения для создания средств контроля вирусов основываются в целом на молекулярном и иммунологическом методах (таблица). В настоящее время к ним относятся компьютерная томография, RT-qPCR (reverse transcription polymerase chain reaction – ПЦР с применением обратной транскрипции, или ПЦР-ОТ); метод амплификации специфического фрагмента РНК и LFICS на основе коллоида Au NPs (метод коллоидного золота). В ряде стран разрешено использование различных диагностических наборов и полосок для обнаружения SARS-CoV-2.

**Сравнительные данные различных методов тестирования COVID-19
(данные в соответствии с полевыми исследованиями 2020 г.)**

Методы	Оборудование	Время считывания (весь протокол)	Стоимость (каждый образец)	Чувствительность/специфичность (избирательность), %	Уровень детализации (LOD)
Компьютерная томография	Аппарат КТ	—	—	97/25	—
RT-qPCR – тест с полимеразной цепной реакцией с обратной транскрипцией (ПЦР-ОТ)	ПЦР-машина	~4 часа	~150 руб.	71/—	—
MNPs based RT-qPCR – тест с ПЦР-ОТ на основе метода извлечения вирусной РНК на основе магнитных наночастиц		Извлечение 30 мин.		—	10 копий
RT-digital PCR – тест с цифровой ПЦР-ОТ	ПЦР-термоциклер (усилитель ДНК)	—		90/100	—
LAMP-based colori metric – изотермическая амплификация с помощью обратной транскрипционной петли для выявления геномной РНК SARS-CoV-2	ПЦР-термоциклер (усилитель ДНК)	20–30 мин.		97,6	—
	Водяная баня	30 мин.		97,6	100 копий
LFICS-Au NPs colloid – (IgM + IgG) – иммуноанализ (иммунохроматографическая полоска с боковым потоком, lateral flow immunochromatographic strip) на основе наночастиц коллоидного золота (антитела IgM + IgG)	Полоски	15 мин.		88,66/90,63	—
ELISA (IgM + IgG) – твердофазный иммуноферментный анализ (enzyme linked immunosorbent assay) на антитела	Считыватель флуоресцентных пластин	~2 ч	—	87,3/100,0	—
Хемилюминесцентный анализ (все антитела)	Автоматический анализатор	—		86,9/99,2	—
ELISA (все антитела) – твердофазный иммуноферментный анализ (enzyme linked immunosorbent assay) на антитела		~2 ч		94,8/100,0	—
LFICS-Au NPs colloid (IgM) – иммуноанализ (иммунохроматографическая полоска с боковым потоком) на основе наночастиц коллоидного золота (антитела IgM)	Полоски	≤15 мин.		96,2/95,2	—
LFICS – флуоресцентный метод (иммунохроматографическая полоска с боковым потоком) путем обнаружения нуклеокапсидного белка (nucleocapsid protein)	Флуоресцентный анализатор	~10 мин.		73,6	—

Исходя из опыта эксплуатации национальной системы мониторинга биотерроризма США BioWatch (ее 1-е поколение развернуто в 2003 г.), можно заключить, что мониторинговые средства контроля должны быть построены на основе сети биодатчиков (биосенсоров) на различных принципах детектирования-тестирования, работающих в автоматическом режиме и реальном масштабе времени. Базовыми требованиями к ним, помимо перечисленных, являются: специфичность, чувствительность, автономность функционирования, высокая скорость тестирования [1].

В зависимости от участия персонала, его квалификации, условий проведения, автоматизации средства контроля можно разделить на следующие четыре группы: традиционные методы — лабораторные условия проведения и квалифицированный персонал; экспресс-методы — возможно проведение «на месте» и вне лаборатории (РОСТ, Point of Care Testing) с минимизацией труда квалифицированного персонала; методы на основе работы автоматизированных устройств с минимизацией труда персонала вообще; автономные мониторинговые комплексы непрерывной работы.

Для ранней диагностики большой потенциал имеют быстрые и сверхчувствительные биосенсоры «на месте», нацеленные на обнаружение антигенов вируса и построенные с применением наноматериалов и нанотехнологий. Их можно использовать в больницах, клиниках, испытательных лабораториях и даже дома, в аэропортах или других местах с интенсивным движением. Для повышения точности диагностики одной из альтернативных стратегий может быть комбинированное обнаружение различных биомаркеров с использованием мультиплексных биосенсоров. Для повышения надежности и воспроизводимости (репродуктивности) биосенсора необходимо разработать процесс обработки сигналов на основе машинного обучения и прямого считывания результатов. Существует острая потребность в домашнем биосенсоре, который должен быть легко доступен (колориметрические полоски и биосенсоры для смартфонов) для внелабораторного тестирования, в том числе в домашних условиях. Перечисленные направления развития биосенсоров для детектирования SARS-CoV-2 востребованы в самых сложных средствах контроля — аппаратуре мониторинга.

Требование автономной работы аппаратуры мониторинга в полностью автоматическом режиме в течение длительного времени накладывает ограничения на применяемые методы детектирования: они должны содержать минимальное количество этапов; сохранять приемлемые чувствительность (не менее 1000 патогенов/мл) и специфичность в сочетании с экспресс-пробоподготовкой; обеспечивать максимально короткое время получения результата. Средства мониторинга должны обладать соответствующими массогабаритными характеристиками и сохранять готовность к немедленной работе после транспортировки, устойчиво работать в неблагоприятных внешних условиях.

Реализованные проекты и прототипы

Для мониторинга состояния зараженности помещений и пространств при скоплении людей в настоящее время используются двухступенчатые методы, совмещающие применение тепловизоров (например, широко применяемые разработки российского концерна «Швабе») и лабораторных приборов-анализаторов класса *in vitro* (в основном методом ПЦР) [12]. Такие традиционные методы обеспечивают достаточную точность, однако не отличаются скоростью получения результата из-за необходимости второго (лабораторного) этапа и, соответственно, не годятся для мониторинговых целей.

Единственное и не имеющее аналогов комплексное решение по мониторингу химической и биологической безопасности для мест массового пребывания людей представлено российскими разработчиками. «Узлами» этой системы стали приборы экспресс-диагностики: «Детектор-Био» (разработчики — входящий в Корпорацию «Ростех» концерн «Швабе» в сотрудничестве с НИЦ эпидемиологии и микробиологии им. Н.Ф. Гамалеи) и «Индикатор-Био» (разработчик — «Троицкий инженерный центр» Корпорации «РОСНАНО» в кооперации с Российским государственным медицинским университетом (РГМУ) им. Н.И. Пирогова).

Компоненты комплекса позволяют как выявить в окружающем воздухе токсичные и отравляющие вещества, биологические токсины и болезнетворные микроорганизмы, так и не допустить проникновения в охраняемые зоны предметов и веществ, содержащих опасные химические и биологические агенты.

Исходя из существующих моделей угроз, разработанное оборудование подразделяется на две группы: «Досмотр» и «Мониторинг» (рисунок) [2].



Комплексное решение по мониторингу химической и биологической безопасности для мест массового пребывания людей

В «Досмотр» входит оборудование, предназначенное для выявления и предотвращения несанкционированного проноса (провоза) на охраняемые объекты опасных химических веществ и биологических агентов, в том числе идентификатор биологических агентов «Индикатор-Био» — для индикации возбудителей инфекционных заболеваний в чрезвычайно низких концентрациях по пробе, взятой с поверхностей различных предметов или непосредственно у пассажира. В «Мониторинг» входит оборудование, предназначенное для обнаружения факта появления и распространения на объекте опасных химических веществ и патогенных биологических агентов, мониторинга воздуха в местах массового скопления людей на транспортных объектах, в том числе автоматический обнаружитель биоаэрозолей «Сегмент-Био» — для непрерывного экспресс-анализа воздуха в целях выявления биологических угроз — и автоматические биологические лаборатории «Детектор-Био» и «Эфир-Био» для выявления и распознавания в воздухе широкого спектра (до 86) опасных биологических агентов.

Параллельно с предыдущей мониторинговой системой, готовой к производству, коллаборация в составе специалистов Университета ИТМО, Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Физического института имени П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) и Московского физико-технического института (МФТИ) разрабатывает оптический биосенсор класса point-of-care для экспресс-диагностики инфекций (декларируемое время — единицы секунд) путем выявления бактерий и вирусов в ИК-диапазоне [3]. Прибор может найти широкое применение на крупных транспортных узлах, в учебных заведениях, на производствах, где требуется постоянный мониторинг инфекционной обстановки. Исследование проводилось в тесном сотрудничестве с Инфекционной клинической больницей № 2 в Москве. Биосенсор обладает высокой чувствительностью и обнаруживает даже очень малые количества бактерий.

Ни одно из коммерчески доступных зарубежных средств контроля в настоящее время не может дать результаты в реальном времени (базовые для подавляющего большинства средств такого рода работают на методе ПЦР, требующего времени для получения результата). Единственная из известных в настоящее время попытка решения этой проблемы была предпринята в Швейцарском федеральном технологическом институте (ETH Zurich) и Швейцарских федеральных лабораториях материаловедения и технологии (Empa). Работающие в них китайские специалисты Цзин Ван И и Гуаньюй Цю разрабатывают плазмонный фототермический биосенсор, который может обнаруживать присутствие SARS-CoV-2 без необходимости проведения ПЦР. Разработчики сообщают, что такой биосенсор может обеспечить результаты в течение 15 мин. – 1 ч. При этом ведется работа по упрощению прототипа до лаборатории на чипе [9].

В отличие от российских мониторинговых систем известные из доступных источников решения зарубежных разработчиков не выдают результаты в реальном времени и в подавляющем большинстве представляют собой фактически воздухозаборники с дальнейшей транспортировкой проб для анализа в лабораторных условиях, как правило с помощью ПЦР-метода. Несмотря на то что время получения результата оценивается в несколько часов, в таких «полумониторинговых» устройствах, по мнению разработчиков, есть смысл и коммерческая оправданность.

1. Компания PhysIQ, США, при поддержке Министерства обороны США, Фонда Генри М. Джексона по развитию военной медицины, дирекции (исполнительного офиса) межведомственной программы США по РХБЗ разрабатывает персональные носимые датчики состояния здоровья, которые устанавливаются на груди или на запястье. Цель проекта – отслеживать прогрессирование COVID-19 у тех, кто знает, что инфицирован. Отмечается, что датчик по совокупности отслеживаемых параметров может также указать своему носителю, который не считает себя заболевшим, на то, что он может быть инфицирован коронавирусом. На основе таких датчиков, а также с внедрением технологий искусственного интеллекта компания PhysIQ реализовала так называемое масштабируемое решение для непрерывного удаленного мониторинга состояния пациентов [11].

2. PathogenDx, США, разработала мобильную систему обнаружения SARS-CoV-2, объединив свои возможности ПЦР-тестирования с пробоотборником воздуха Coriolis от компании Bertin Instruments¹, Франция. Собранные образцы направляются в лабораторию, а результаты обнаружения SARS-CoV-2 могут быть получены менее чем за 10 ч. Предназначение такого средства контроля – прежде всего офисные помещения и иные внутренние помещения длительного плотного пребывания людей [4].

3. Sartorius, Германия, разработала пробоотборники воздуха MD8, MD8 Airscan[®] и Airport MD8. Устройства предназначены для обнаружения мельчайших вирусов и микроорганизмов в воздухе с помощью специально разработанных желатиновых мембранных фильтров (GMF) и агаровых пластин BactairTM. Устройство запатентовано и прошло полевые испытания в двух больницах в г. Ухань, Китай [5].

4. Assured Bio Labs, США, анонсировала собственные алгоритмы и организационно-методические решения для мониторинга воздуха промышленных предприятий и общественных объектов с применением специально разработанной системы непрерывного мониторинга воздуха WhisperCare[®] на основе детекции РНК. При этом время получения результатов – 48–72 ч с времени доставки взятых проб в лабораторию компании – свидетельствует о том, что совершенствование и автоматизация только организационной составляющей, без совершенствования методов анализа реальных проб, дают слишком общие либо «просроченные» результаты [6].

¹ Bertin Instruments – транснациональная приборостроительная компания со штаб-квартирой во Франции. Специализируется на оборудовании РХБЗ и медицинском приборостроении.

5. InnovaPrep, США, предлагает портативные устройства отбора проб для проведения экспресс-мониторинга воздуха, сточных вод и поверхностей. Для этого предлагаются портативный прибор отбора проб воздуха ADC-200 Bobcat и концентрирующая пипетка (CP) Select для получения проб сточных вод и материала с поверхностей. Дальнейший анализ проб проходит в лаборатории методом ПЦР [7].

6. Eurofins Scientific, Люксембург, разработала и внедряет тест ПЦР-ОТ в реальном масштабе времени для обнаружения коронавирусов, а также идентификации SARS-CoV-2 (COVID-19) на поверхностных мазках [8].

7. Экзотические методы детектирования. Правительство Великобритании выделило группе специалистов-исследователей более 0,5 млн фунтов стерлингов, чтобы выяснить, можно ли использовать специально обученных собак-биодетекторов в качестве новой меры быстрого тестирования COVID-19 [10].

Патентные и иные источники информации в области создания средств контроля и мониторинга патогенных биоагентов COVID-19 позволяют сформировать мнение о наличии ограниченного количества подходящих технико-технологических решений для построения на их основе интегрированных универсальных приборов автономного типа в интересах контроля биопатогенов в различных средах. Приведенные выше примеры свидетельствуют о доминировании разработок приборов анализа биоаэрозолей. Анализ сточных вод, поверхностей уделяется гораздо меньше внимания.

Таким образом, из ряда уже существующих прототипов и готовых к производству устройств, тем или иным способом используемых для детектирования вирусов (в том числе COVID-19) и в целом идентификации патогенных биоагентов, только единицы представляют полностью автономные системы, способные оперативно срабатывать (но не в реальном масштабе времени!), показывая присутствие патогенов в воздухе. Ни одного комплексного решения, имеющего устойчиво работоспособные прототипы, на настоящее время не существует, за исключением российских разработок «Детектор-Био», «Индикатор-Био» и «Эфир-Био». Эти разработки действительно не имеют мировых аналогов и демонстрируют высочайший уровень российской науки и технологий.

Отсутствие комплексных проектов зарубежных научно-исследовательских коллабораций и компаний объясняется слабой заинтересованностью коммерческих структур (например, в сфере общественного транспорта) в покупке и эксплуатации таких мониторинговых приборов, не говоря о распределенных системах наблюдения и контроля. Заинтересованность в создании и развертывании таких систем могут проявлять только крупные (ведущие) государства мира.

Статья выполнена в ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по результатам работ в рамках Государственного задания № 075-01394-20-02.

Список литературы

1. США создает новую систему быстрого предупреждения о применении биологического оружия. URL: <https://tehnowar.ru/87519-ssha-sozdaet-novuju-sistemu-bystrago-preduprezhdenija-o-primenenii-biologicheskogo-oruzhija.html> (дата обращения: 02.11.2020).

2. Мониторинг атмосферного воздуха, индикация и идентификация опасных химических веществ, биологических агентов и продуктов их жизнедеятельности. URL: <http://www.analizator.ru/directions/khimicheskaya-i-biologicheskaya-bezopasnost> (дата обращения: 02.11.2020); Как остановить распространение коронавируса с помощью эффективных средств диагностики? URL: <https://security.wekey.ru/blog/kak-ostanovit-rasprostranenie-koronavirusa-s-pomoshchyu-effektivnykh-sredstv-dagnostiki.html> (дата обращения: 02.11.2020).

3. Baikova T.V., Danilov P.A., Gonchukov S.A., et al. Diffraction microgratings as a novel optical biosensing platform // Laser Physics Letters. 2016.

4. Сайт Bertin Instruments. URL: <https://www.bertin-instruments.com/coriolis-combined-with-envirox-rv-tests-for-environmental-monitoring-for-sars-cov-2-detection> (дата обращения: 02.11.2020).
5. Сайт Sartorius. URL: <https://www.sartorius.com/en/pr/covid-19-solutions/covid-19-research-products/covid-19-air-monitoring> (дата обращения: 02.11.2020).
6. Сайт AssuredBio. URL: <https://assuredbio.com/covid-19-environmental-testing-program> (дата обращения: 02.11.2020).
7. Сайт InnovaPrep. URL: <https://www.innovaprep.com/covid-19> (дата обращения: 02.11.2020).
8. Сайт EuroFins. URL: <https://www.eurofins.com/covid-19-response/surface-testing-services> (дата обращения: 02.11.2020).
9. Швейцарские исследователи создали биосенсор для обнаружения вируса COVID-19 в воздухе. URL: <https://news.sputnik.ru/progress/eea9c522d739f0ec6749ef88a682a5366878cdc3> (дата обращения: 02.11.2020).
10. В Великобритании собак обучают находить больного COVID-19 даже в толпе. URL: https://www.1tv.ru/news/2020-05-23/386387-v_velikobritanii_sobak_obuchayut_nahodit_bolnogo_covid_19_dazhe_v_tolpe (дата обращения: 02.11.2020).
11. PhysIQ is leading the way during the COVID-19 crisis by offering a massively scalable solution for continuous remote patient monitoring. URL: <https://www.physiq.com/covid-19> (дата обращения: 02.11.2020).
12. Технологии против COVID-19. URL: <https://www.comnews.ru/content/209415/2020-10-06/2020-w41/tekhnologii-protiv-covid-19> (дата обращения: 02.11.2020).

References

1. *SShA sozdaet novuyu sistemu bystrogo preduprezhdeniya o primenenii biologicheskogo oruzhiya* [The United States is creating a new rapid warning system for the use of biological weapons]. Available at: <https://tehnowar.ru/87519-ssha-sozdaet-novuyu-sistemu-bystrogo-preduprezhdeniya-o-primenenii-biologicheskogo-oruzhiya.html> (date of access: 02.11.2020).
2. *Monitoring atmosfernogo vozdukh, indikatsiya i identifikatsiya opasnykh khimicheskikh veshchestv, biologicheskikh agentov i produktov ikh zhiznedeyatel'nosti* [Monitoring of atmospheric air, indication and identification of hazardous chemicals, biological agents and products of their vital activity. Available at: <http://www.analizator.ru/directions/khimicheskaya-i-biologicheskaya-bezopasnost> (date of access: 02.11.2020)] *Kak ostanovit' rasprostraneniye koronavirusa s pomoshch'yu effektivnykh sredstv diagnostiki?* [How to stop the spread of coronavirus with effective diagnostic tools?]. Available at: <https://security.wekey.ru/blog/kak-ostanovit-rasprostraneniye-koronavirusa-s-pomoshchyu-effektivnykh-sredstv-diagnostiki.html> (date of access: 02.11.2020).
3. Baikova T.V., Danilov P.A., Gonchukov S.A., et al. (2016) Diffraction microgratings as a novel optical biosensing platform. *Laser Physics Letters*.
4. *Sayt Bertin Instruments* [Bertin Instruments website]. Available at: <https://www.bertin-instruments.com/coriolis-combined-with-envirox-rv-tests-for-environmental-monitoring-for-sars-cov-2-detection> (date of access: 02.11.2020).
5. *Sayt Sartorius* [Sartorius website]. Available at: <https://www.sartorius.com/en/pr/covid-19-solutions/covid-19-research-products/covid-19-air-monitoring> (date of access: 02.11.2020).
6. *Sayt AssuredBio* [AssuredBio website]. Available at: <https://assuredbio.com/covid-19-environmental-testing-program> (date of access: 02.11.2020).
7. *Sayt InnovaPrep* [InnovaPrep website]. Available at: <https://www.innovaprep.com/covid-19> (date of access: 02.11.2020).
8. *Sayt EuroFins* [EuroFins website]. Available at: <https://www.eurofins.com/covid-19-response/surface-testing-services> (date of access: 02.11.2020).
9. *Shveytsarskie issledovateli sozdali biosensor dlya obnaruzheniya virusa COVID-19 v vozdukh* [Swiss researchers have created a biosensor to detect the COVID-19 virus in the air]. Available at: <https://news.sputnik.ru/progress/eea9c522d739f0ec6749ef88a682a5366878cdc3> (date of access: 02.11.2020).

10. *V Velikobritanii sobak obuchayut nakhodit' bol'nogo COVID-19 dazhe v tolpe* [In the UK, dogs are trained to find a patient with COVID-19, even in a crowd]. Available at: https://www.ltv.ru/news/2020-05-23/386387_v_velikobritanii_sobak_obuchayut_nahodit_bolnogo_covid_19_dazhe_v_tolpe (date of access: 02.11.2020).

11. PhysIQ is leading the way during the COVID-19 crisis by offering a massively scalable solution for continuous remote patient monitoring. Available at: <https://www.physiq.com/covid-19> (date of access: 02.11.2020).

12. *Tekhnologii protiv COVID-19* [Technologies against COVID-19]. Available at: <https://www.comnews.ru/content/209415/2020-10-06/2020-w41/tekhnologii-protiv-covid-19> (date of access: 02.11.2020).

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE – FEDERAL RESEARCH CENTRE
FOR PROJECTS EVALUATION AND CONSULTING SERVICES
(SRI FRCEC)

INNOVATICS AND EXPERT EXAMINATION

ISSUE 2(30)

MOSCOW 2020

ИННОВАТИКА И ЭКСПЕРТИЗА

2(30)

Москва 2020

Ответственный редактор *А.А. Тугаринов*

Компьютерная верстка *А.А. Тугаринов*

Корректор *А.В. Соколова*

Перевод *В.Е. Гелюта*

Сдано в набор 28.10.20. Подписано в печать 30.11.20.

Формат 205×287. Бумага 80 г/м².

Тираж 81. Заказ № 23.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение

«Научно-исследовательский институт –

Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы»

Москва, ул. Антонова-Овсеенко, д. 13