ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ВЫПУСК 1(64)/2022

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-73606 от 31 августа 2018 г.

г. Ханты-Мансийск
2022 г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА «ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА»

Лапшин Валерий Федорович – главный редактор, доктор юридических наук, доцент, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет» – главный редактор, v_lapshin@ugrasu.ru, +7 (3467) 377-000 (доб. 559);
Шарова Полина Сергеевна – ответственный секретарь редакционной коллегии, заведующий единой редакцией научных журналов ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», p_sharova@ugrasu.ru, +7 (3467) 377-000 (доб. 421);
Бурундукова Елена Михайловна – ответственный редактор по направлению 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление по специальности 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки); по направлению 5.2 Экономика по специальности 5.2.3 Региональная и отраслевая экономика (экономические науки), кандидат экономических наук, доцент, директор Института цифровой экономики ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;
Зеленский Владимир Иванович – ответственный редактор по направлению 05.16.00 Металлургия и материаловедение по специальности 05.16.09 Материаловедение (по отраслям) (технические науки); по направлению 2.4 Энергетика и электротехника по специальности 2.4.3 Электроэнергетика (технические науки), кандидат физико-математических наук, доцент, директор Института нефти и газа ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;
Миронов Андрей Валерьевич – ответственный редактор по направлению 5.3 Психология по специальности 5.3.4 Педагогическая психология, психодиагностика цифровых образовательных сред (психологические науки), кандидат психологических наук, доцент, директор Гуманитарного института ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;
Розенко Станислав Васильевич – ответственный редактор по направлению 12.00.00 Юридические науки по специальности 12.00.08 Уголовное право и криминология; уголовно-исполнительное (юридические науки), кандидат юридических наук, директор Юридического института ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет».

05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление по специальности 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки):

Вохминцев Александр Владимирович – доктор технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Интеллектуальные информационные технологии и системы» ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет» совместно с ФИЦ «Информатика и управление Российской академии наук Института системного анализа»;
Загребина Софья Александровна – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, заведующий кафедрой «Математическое и компьютерное моделирование» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государстенный университет»;
Кожанов Александр Иванович – доктор физико-математических наук, профессор ФГБУН «Институт математики имени С. Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук»;
Кутышкин Андрей Валентинович – доктор технических наук, профессор Института цифровой экономики ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;
Мельников Андрей Витальевич – доктор технических наук, профессор базовой кафедры ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет» на базе АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий», директор АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий»;
Полищук Юрий Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник центра дистанционного зондирования Земли АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий»;
Попков Юрий Соломонович – доктор технических наук, профессор, академик РАН, директор Института системного анализа Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук»;
Пятков Сергей Григорьевич – доктор физико-математических наук, профессор Института цифровой экономики ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет».

05.16.00 Металлургия и материаловедение по специальности 05.16.09 Материаловедение (по отраслям) (технические науки):

Алымов Михаил Иванович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Директор ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения (ИСМАН) РАН;
Баев Владимир Константинович – доктор технических наук, главный научный сотрудник ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики имени С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук»;

Гуляев Павел Юрьевич – доктор технических наук, профессор Высшей инжиниринговой школы Института нефти и газа ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;
Еськов Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор, начальник кафедры информационной безопасности ФГКОУ ВО «Краснодарский университет Министерства внутренних дел Российской Федерации»;
Клименко Любовь Степановна – доктор химических наук, профессор Высшей нефтяной школы Института нефти и газа ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;
Нехорошев Сергей Викторович – доктор технических наук, главный научный сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории БУ «Ханты-Мансийская государственная медицинская академия»;
Пронин Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова»;
Сахаров Юрий Владимирович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры физической электроники ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

12.00.00 Юридические науки по специальности 12.00.08 Уголовное право и криминология; уголовно-исполнительное (юридические науки):

Авдеев Вадим Авдеевич – доктор юридических наук, профессор кафедры уголовного права и уголовного процесса Юридического института ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;
Анисимов Валерий Филиппович – доктор юридических наук, профессор кафедры правоохранительной деятельности и адвокатуры Юридического института ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;
Козаченко Иван Яковлевич – доктор юридических наук, профессор, заведующий кафедрой уголовного права ФГБОУ ВО «Уральский государственный юридический университет»;
Кибальник Алексей Григорьевич – доктор юридических наук, профессор заведующий кафедрой уголовного права и процесса ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»;
Понятовская Татьяна Григорьевна – доктор юридических наук, профессор, профессор кафедры уголовного права ФГБОУ ВО «Московский государственный юридический университет имени О. Е. Кутафина».
Рарог Алексей Иванович – доктор юридических наук, профессор научный руководитель кафедры уголовного права ФГБОУ ВО «Московский государственный Юридический университет имени О. Е. Кутафина»;
Сергевнин Владимир Анатольевич – доктор юридических наук, профессор, директор Центра прикладного уголовного правосудия, профессор Школы правоохранения и управления юстицией Западного Иллинойского университета;
Шеслер Александр Викторович – доктор юридических наук, профессор кафедры уголовного права ФКОУ ВО «Кузбасский институт Федеральной службы исполнения наказаний», профессор кафедры уголовного права ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

2.4 Энергетика и электротехника по специальности 2.4.3 Электроэнергетика (технические науки):

Горюнов Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»;
Ковалев Владимир Захарович – доктор технических наук, профессор Высшей инжиниринговой школы Института нефти и газа ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;
Новожилов Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика» Павлодарского государственного университета им. С. Торайгырова (Казахстан);
Никитин Константин Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»;
Осипов Дмитрий Сергеевич – доктор технических наук, профессор Высшей инжиниринговой школы Института нефти и газа ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;
Сидоров Олег Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения»;
Сычев Юрий Анатольевич – доктор технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электромеханика» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет»;
Харламов Виктор Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения»;

5.2 Экономика по специальности 5.2.3 Региональная и отраслевая экономика (экономические науки):

Грошев Александр Романович – доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-образовательного центра Института экономики и управления БУ ВО ХМАО-Югры «Сургутский государственный университет»;
Дорошенко Светлана Викторовна – доктор экономических наук, доцент, заведующий сектором исследований адаптации региональных систем ФГБУН «Институт экономики Уральского отделения РАН»;
Исламутдинов Вадим Фаруарович – доктор экономических наук, профессор кафедры экономической теории ЧОУ ВО «Казанский инновационный университет им. В. Г. Тимирясова» (ИЭУП);

Каратаева Галина Евгеньевна – доктор экономических наук, профессор кафедры финансов, денежного обращения и кредита БУ ВО ХМАО-Югры «Сургутский государственный университет»;
Куриков Владимир Михайлович – доктор экономических наук, профессор кафедры бизнеса и экономики Института цифровой экономики ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», Советник Председателя Думы ХМАО-Югры;
Попова Лариса Витальевна – доктор экономических наук, профессор кафедры экономической безопасности ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет»;
Родионов Алексей Владимирович – доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры экономики и менеджмента Экономического факультета ФКОУ ВО «Академия права и управления Федеральной службы исполнения наказаний»;
Хромцова Лина Сергеевна – кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой бизнеса и экономики Института цифровой экономики ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;
Шеломенцев Андрей Геннадьевич – доктор экономических наук, профессор, заведующий отделом исследований региональных социально-экономических систем ФГБУН «Институт экономики Уральского отделения РАН».

5.3 Психология по специальности 5.3.4 Педагогическая психология, психодиагностика цифровых образовательных сред (психологические науки):

Григорьева Марина Владимировна – доктор психологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Педагогическая психология и психодиагностика» ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского»;
Духновский Сергей Витальевич – доктор психологических наук, доцент, профессор Высшей психолого-педагогической школы ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;
Забелина Екатерина Вячеславовна – доктор психологических наук, доцент кафедры специальной и клинической психологии ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет»;
Исаев Евгений Иванович – доктор психологических наук, профессор кафедры «Педагогическая психология имени профессора В. А. Гуружапова» ФГБОУ ВО «Московский государственный психолого-педагогический университет»;
Микляева Анастасия Владимировна – доктор психологических наук, доцент, профессор кафедры психологии человека ФГБОУ ВО «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена»;
Мищенко Владимир Александрович – доктор педагогических наук, доцент, профессор Высшей психолого-педагогической школы ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;
Смирнов Александр Васильевич – доктор психологических наук, доцент, профессор кафедры общей психологии и конфликтологии ФГБОУ ВО «Уральский государственный педагогический университет»;
Темнова Лариса Витальевна – доктор психологических наук, профессор кафедры современной социологии ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова».

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

РОССИЙСКИЙ ИНДЕКС НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ
Science Index

ISSN 1816-9228 (печатная версия)
ISSN 2078-9114 (электронная версия)
Журнал издается с 2005 года
Журнал включен в РИНЦ

© ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ 7

Grigoryevskaya A. A., Gulyaev P. Yu.
Spin instability of technological combustion mode in a wave of self-propagating high-temperature synthesis 9

Касьяненко Е. М., Омельченко А. И.
Исследование деформации биологических тканей с фототермическими наночастицами под действием лазерного излучения 21

Сафронов Н. Н., Харисов Л. Р., Фазлыев М. Р.
Оптимизация модифицирования силуминового сплава лигатурой Al-Ti-B, полученной из дисперсных отходов машиностроения электрошлаковым литьём 32

Снитовский Ю. П.
Структурно-фазовая неоднородность алюминиевых пленок в многослойных системах 42

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА 57

Долгих Н. Н., Дюба Е. А., Осипов Д. С.
Разработка рекурсивной модели расчета переходных процессов в электрических сетях с помощью вейвлет преобразования 59

Ковалев В. З., Щербаков А. Г., Хамитов Р. Н.
Разработка метода анализа и прогноза качества электроэнергии микрогрид Крайнего Севера 67

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 77

Алексеев В. И.
Исследование согласованности изменений гелиокосмических и климатических переменных в условиях глобального потепления на основе вейвлетного фазового анализа 79

Пятков С. Г., Белоногов В. А.
О некоторых классах стационарных обратных задач определения коэффициента теплообмена для математических моделей тепломассопереноса 101

Бредихин А. И.
Подход к оценке запасов углерода в ХМАО-Югре с помощью углеродных карт 118

Вохминцев А. В., Ботов Д. С., Петриченко Ю. В.
Поиск по подобию зон трещиноватостей в базах данных
сейсморазведочной информации на основе метода решения вариационной задачи ICP
в замкнутой форме и инвертированного индекса 134

ЭКОНОМИКА СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ 145

Грошева Т. А., Дивеева Г. В.
Реализация подходов «бережливого региона» в развитии системы
оценки качества образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры..... 147

Михайлюк О. Н., Бурундукова Е. М.
Сравнительный анализ реализации программ устойчивого развития КМНС
северных и арктических регионов России и мира..... 155

УГОЛОВНОЕ ПРАВО И КРИМИНОЛОГИЯ.
УГОЛОВНО-ИСПОЛНИТЕЛЬНОЕ ПРАВО 167

Головастова Ю. А., Гордополов А. Н.
К вопросу об обстоятельствах, снижающих и повышающих
общественную вредность злостного нарушения
режима отбывания наказания и личности осужденного 169

Козаченко И. Я., Сергеев Д. Н.
Пенализация генетических преступлений..... 178

Короткий Ф. В.
Проблемные аспекты криминализации посягательств на свободу
экономических отношений в сфере закупок товаров, работ и услуг..... 189

Подройкина И. А.
Система наказаний в современном уголовном праве Франции 197

Ситникова А. И.
Институт соучастия в свете законодательной текстологии 205

ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ И ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПРОБЛЕМ ОБРАЗОВАНИЯ..... 213

Гильманов С. А., Зеленая А. В.
Рефлексивное эссе о музыкальном произведении
как способ развития творческого потенциала учащихся 215

Журавлева Ю. А.
Ресурсный подход к профессиональному благополучию педагогов
в условиях Крайнего Севера..... 226

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 г. Выпуск 1 (64). С. 9–20

УДК 53.82.63
DOI: 10.18822/byusu20220109-20

SPIN INSTABILITY OF TECHNOLOGICAL COMBUSTION MODE IN A WAVE OF SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS

Angelica A. Grigoryevskaya
Bachelor, Trainee Researcher of Mechanics and Mathematics Faculty,
Novosibirsk National Research University.
Novosibirsk, Russia
ORCID: 0000-0002-9909-7337
E-mail: a.a.grig@bk.ru

Pavel Yu. Gulyaev
Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Institute of Oil and Gas,
Yugra State University.
Khanty-Mansiysk, Russia
ORCID: 0000-0002-4337-1253
E-mail: p_gulyaev@ugrasu.ru

This study was partially funded by a scholarship from the Novosibirsk City Hall (by the City Hall resolution of August 24, 2020 N 2587).

The results of a computer experiment to determine the invariant properties of the Trace transform of a two-dimensional chronogram of wave propagation in the spin combustion mode of the Ni-Al system are presented. The chronogram model was chosen in the form of four sets of isocline lines, the angle of inclination of which corresponded to the value of the tangential velocity from 16.5 to 41.8 m/s. A high degree of shift invariance of the Trace-transformation nodes was found, the error in determining the coordinates of which is limited only by the presence of the initial additive geometric noise in the image of the differential chronogram of the combustion wave. Scale invariance properties in practice provide a dynamic magnification range of 40 dB.

Keywords: SHS combustion wave, instability, spin combustion, chronoscopy, Trace transformation, scale invariance, criterion.

СПИНОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ГОРЕНИЯ В ВОЛНЕ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

Григорьевская Анжелика Анатольевна
бакалавр, стажер-исследователь
механико-математического факультета
ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный
исследовательский университет»,
Новосибирск, Россия
ORCID: 0000-0002-9909-7337
E-mail: a.a.grig@bk.ru

Гуляев Павел Юрьевич
доктор технических наук,
профессор Института нефти и газа,
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»
Ханты-Мансийск, Россия
ORCID: 0000-0002-4337-1253
E-mail: p_gulyaev@ugrasu.ru

Представлены результаты компьютерного эксперимента по определению инвариантных свойств Trace-преобразования двумерной хронограммы распространения волн в режиме спинового горения системы Ni-Al. Модель хронограммы была выбрана в виде четырех наборов изоклинных линий, угол наклона которых соответствовал значению тангенциальной скорости от 16,5 до 41,8 м/с. Обнаружена высокая степень инвариантности к сдвигу узлов Trace-трансформации, погрешность определения координат которых ограничивается только наличием исходного аддитивного геометрического шума на изображении дифференциальной хронограммы волны горения. Свойства масштабной инвариантности на практике обеспечивают динамический диапазон увеличения 40 дБ.

Ключевые слова: волна горения СВС, неустойчивость, спиновое горение, хроноскопия, Trace-преобразование, масштабная инвариантность, критерий.

Introduction

Currently, technologies for finishing 3D-printing of metal-ceramic products, such as laser cladding of powders and plasma spraying on the surface of machine parts, have become widespread, but high-temperature synthesis (SHS) technology has the highest productivity [1-3]. The high productivity of technologies for producing nanostructured composites by the SHS method is limited only by the rate and stability of technological combustion [4]. As noted in [5], when using strengthening additives based on amorphous boron, the combustion wave propagates in a mode close to a thermal explosion. On the scale of microheterogeneity of the initial powder mixture, the characteristic time of synthesis and structure formation in the SHS front does not exceed 1 ms [6]. A short time of physical processes requires the use of optoelectronic measuring complexes of nanosecond resolution [7, 8], which make it possible to control not only the temperature and velocity in the combustion wave [9, 10], but also the diffusion-thermal stability of the SHS wave [11], especially in the case of low-exothermic synthesis of materials [12-14] or in the case of introducing a large mass fraction of inert functional additives [15, 16]. Thus, an urgent task is the development of a high-performance computational technology for processing large volumes of video data coming from recording the propagation of the SHS combustion wave [17], which can be solved by compressing information using the differential chronoscopy (DCS) method based on image binarization and calculating the interframe difference [18], and the subsequent application of the Trace-transformation [19, 20] for recognizing the causes of local instability of the microheterogeneous front combustion [21, 22]. The physical basis that ensures the feasibility and high efficiency of the application of these computational algorithms in practice are such features of solid-flame combustion as the competition between the processes of oxidant diffusion and heat removal from the reaction zone [23], which are manifested in the phenomenon of temperature hysteresis of the velocity of the combustion front movement [24] and the prolonged stage depression of the combustion wave for the time of thermo-chemical induction required for ignition of the next layer of exothermic mixture of products [25]. The calculation of the interframe increment of the combustion front coordinate used in the DCS method, due to the constancy of the thermal diffusivity and heat capacity of powder particles from one material, introduces the invariance of the DCS map, which displays the motion of the combustion front isotherm lines, regardless of the particle size [26]. In this case, although the initial spatial shape and structure of the SHS front is largely determined by the ran-

dom structure of the powder mixture and the diffusion-thermal instability of the combustion process [27], the spatial structure of the differential 2D-map of the DCS has a strictly ordered form of periodic isoclines of the trajectories of the combustion front, separated by equal intervals heating time and thermochemical induction [28]. Violation of this ordering makes it possible to quickly identify unstable combustion modes using formal features used in Trace analysis [29].

The aim of this work is to study the invariant properties that formal features of instability of spin combustion should have when changing the scale of the image and a shift of front in space during the motion of the SHS wave

Description of the problem

The theoretical foundations of mathematical modeling of combustion modes were laid in [18, 28], where the model consists of the heat conduction equation and the kinetic equation:

$$c\rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial h^2} \right) + \rho_0 Q \frac{\partial \eta}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \begin{cases} k_0(1-\eta)\exp\left(-\dfrac{E}{RT}\right) & \eta < 1, \\ 0 & \eta \geq 1 \end{cases},$$

with the generally accepted designation of physical quantities, except for cylindrical coordinates: r is the radius, φ is the polar angle, h is the layer height.

The 2-dimensional model described here uses temperature for several layers of porous powder packaging:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + f;$$

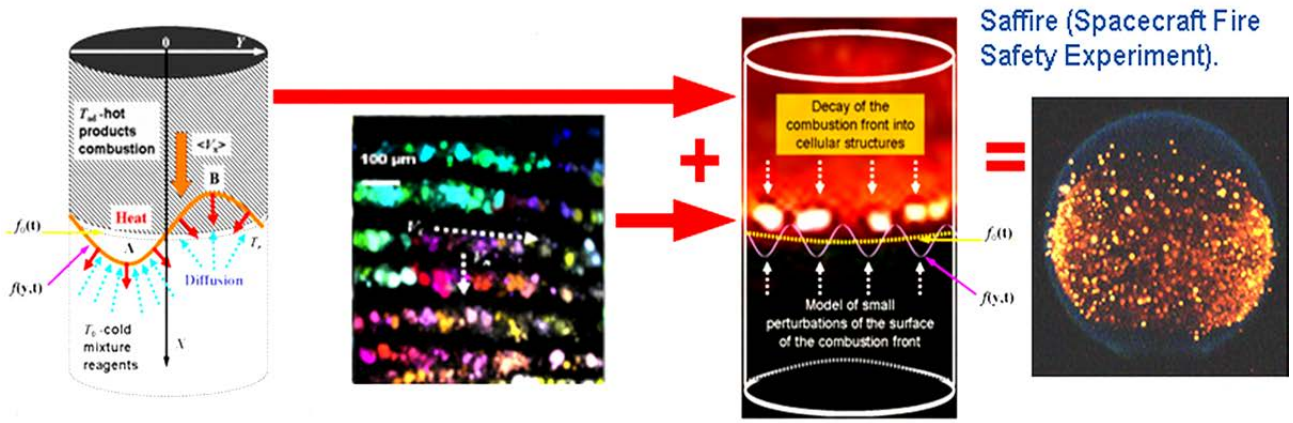
$$\frac{\partial A}{\partial t} = L\left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right); \quad (2)$$

Here are indicated: T- layer temperature; A_{Ni}, B_{Al} – the corresponding concentration of the components of the mixture in the layer; the coefficients k, L, and M can be set in the whole table space from the generated initial mixture structure file [18].

When analyzing the stability of the combustion front for equations (1) and (2) in the works of Zeldovich and Barenblatt [27, 30], as a visual feature of the decay of the thermal diffusion flame front into small thermal structures, characteristic scales were introduced into consideration in the form of a model of small perturbations:

$$x = f(y, t) = \varepsilon \exp(iky + i\omega t + \varphi t) \sim \varepsilon \exp(\varphi t)\sin(ky), \quad (3)$$

where: $f(y, t)$ – combustion front surface; ε is a small value; k is the wave number of the transverse disturbance; ω is the circular frequency for the time of thermochemical induction; φ is the temperature decay decrement of the Michelson heating zone (see Figure 1a, 1c).



a. b. c. d.

Figure 1. Visualization of the combustion wave front instability: a – laminar mode [27, 30], b – spin mode [18, 34], c – discrete mode [31, 32], d – combustion mode by "hot spots" in space [33]

The instability of the visually observed sample combustion rate V^* along the OX axis is related to the local curvature of the combustion front by the following relationship:

$$V^* = <V_x> + \frac{E(D-\alpha)}{2RT_{ad}} \times \frac{\partial^2 f(y,t)}{\partial y^2}. \quad (4)$$

Here are denoted: $<V_x>$ – unperturbed velocity of propagation of a flat front; E is the activation energy; T_{ad} is the combustion temperature; D is the diffusion coefficient of the fuel mixture component; α is the coefficient of thermal diffusivity of the mixture of powders; h is the dimensionless heat transfer efficiency coefficient from the reaction zone. In this case, the reaction temperature of technological combustion in a disturbed wave front must satisfy the following conditions:

$$T_r = T_{ad} + (T_{ad} - T_0)h \times e^{iky + i\omega t + \varphi t}. \quad (5)$$

The next significant result in the study of the thermal instability of the SHS combustion wave was the work [34], in which it was shown that under certain conditions (4) and (5) the combustion front breaks, and after that one or several “hot spots” begin to move along the surface of the sample as shown in Figure 1b and 1c. This type of combustion was called "spin mode". Analyzing the results of numerical experiments [18], the authors determined the range of values of the parameter α, when a flat front that satisfies the above conditions (2) – (5) will be unstable:

$$\alpha_{unst} = 9{,}1\frac{cRT_{ad}^2}{EQ} - 2{,}5\frac{RT_{ad}}{E} \le 1. \quad (6)$$

Here c is the specific heat capacity; R is the universal gas constant; Q is the thermal effect of the reaction. Figure 2 shows the results of a computer model of the SHS spin mode [18] and a physical experiment [12].

From equation (5), the instability of the combustion wave can occur at the critical value of the parameter h, which decreases in the absence of convective heat transfer, which is a feature of combustion in weightlessness. In 2020, the NASA experiment (Saffire) was completed, which showed [33] that under microgravity conditions, combustion has two phases: a long depressive phase, the so-called “cold combustion”, and rapid combustion in chaotically located “hot spots” (see Figure 1d).

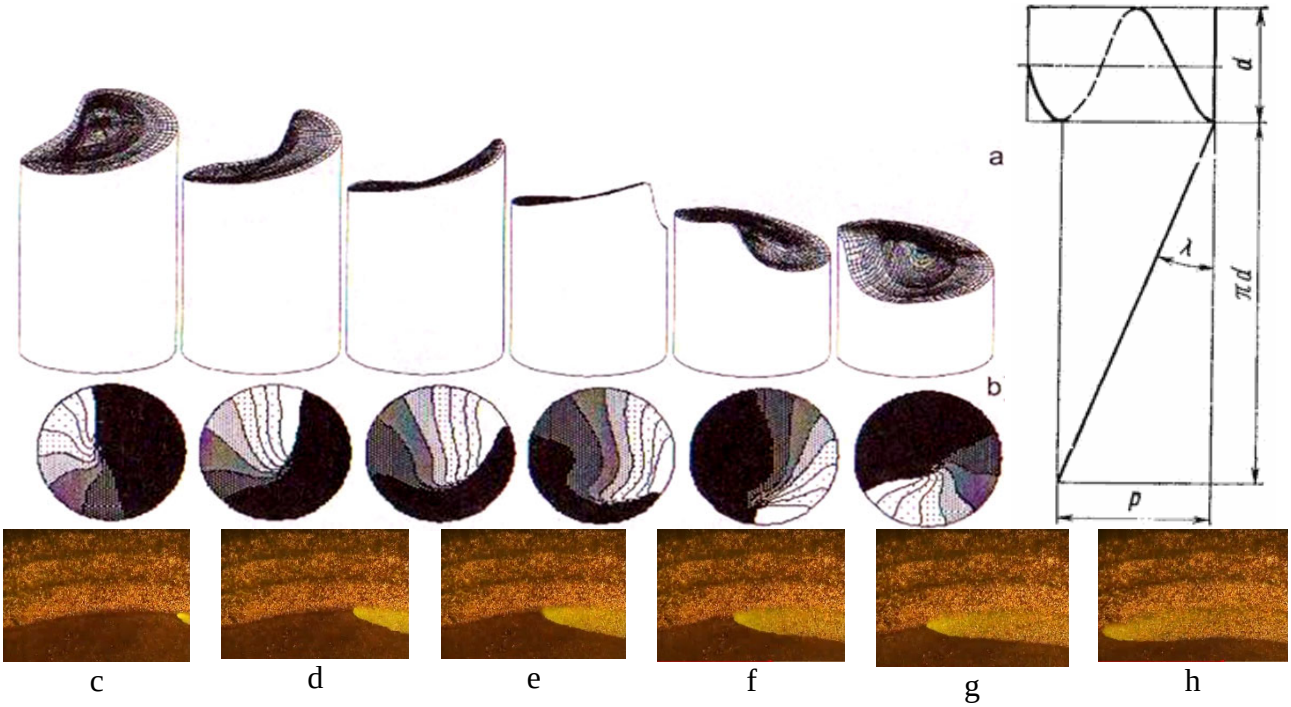


Figure 2. Visualization of SHS combustion front propagation in the spin mode: a and b – computer model [18]; c, d, e, f, g, h – an experiment of recording a combustion wave using high-speed brightness micropyrometry (the higher temperature, the brighter corresponding area) [12]

With uniform rotational and translational motion of the combustion wave along the vertical axis, the angle of elevation of the helix λ is determined from the relationship:

$$tg\lambda = \frac{P}{2\pi r} = \frac{P}{\pi d}, \tag{7}$$

where P is helix pitch, r is the shortest distance of a point from the axis of rotation; d is the diameter of the cylindrical sample on which the combustion wave propagates in the spin mode (see Figure 2). The authors of work [18] showed the correspondence of condition (6), for small values of λ and tg(λ), to formula (7). Thus, the angle of inclination of the helical surface (7) can be considered as a simple visually observable criterion for the stability of a combustion wave in the spin mode.

Considering the above, in Figure 3 one can see the following signs of an unstable spin combustion regime: : a – disintegration of the front into "hot spots"; b – - two stages of combustion "fast" and "depressive" determining the time of thermochemical induction and the thermal thickness of the SHS wave ; c – isoclines on the DCS map when burning in stable mode.

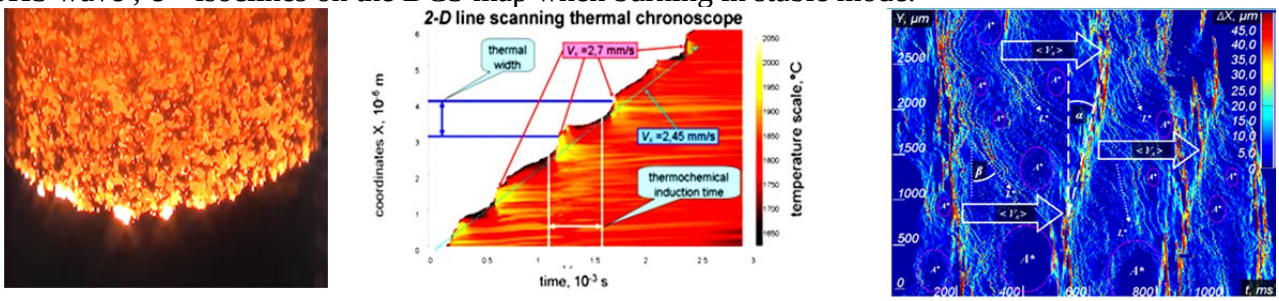


Figure 3. Visual signs of spin instability of the SHS combustion wave in the Ni-Al system

Computer experiment technique

Previously [23, 24, 28], in all experimentally obtained two-dimensional combustion wave chronograms (2D CCS map), three combustion zones can be conventionally distinguished: 1 – unstable ignition; 2- stationary; 3 – change in the direction of spin combustion when the wave is extinguished, as shown in Figure 4.

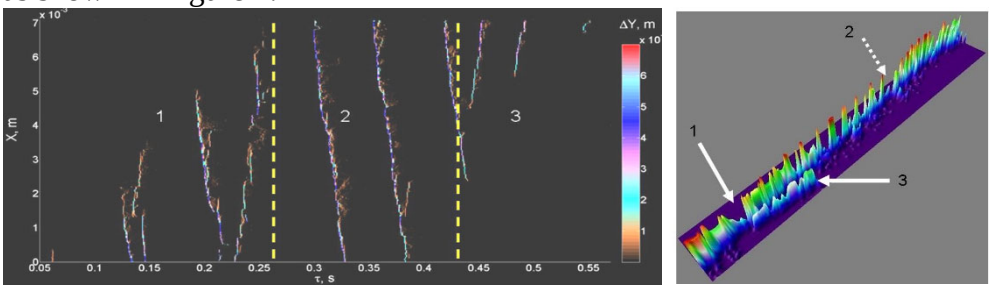


Figure 4. DCS-map of spin instability: 1- node of “strong” instability; 2 – node "weak" instability; 3 – a branch of a part of the combustion front in the direction of the opposite spin.

Figure 5a shows how the Trace transform computes the functional T with respect to the parameter t along the trace line, which is not necessarily integrable in the usual sense. In the stable spin combustion mode, the DCS map is a set of periodic isoclines, and this results in point nodes in the 2D image of the Trace transform, as shown in Figure 5b.

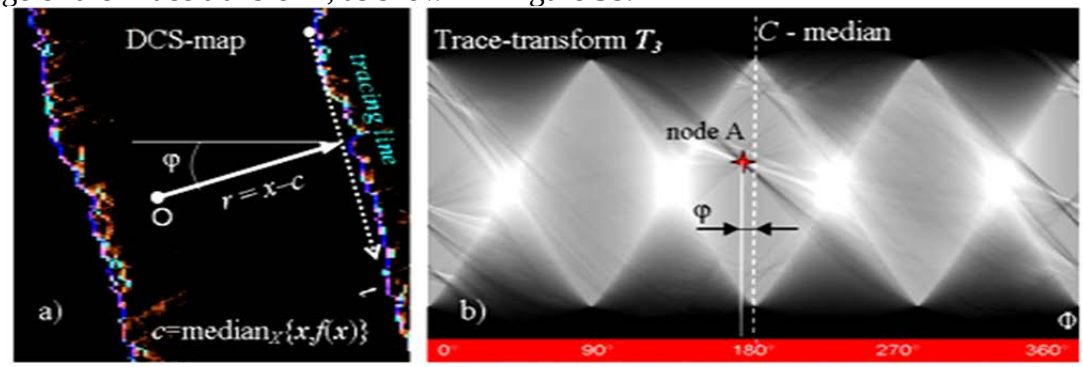


Figure 5. DCS-map (left) and emergence of nodes in the Trace-transform sinogram (right)

Of all the currently known types of functionals (see Table 1) used in standard Trace-transformations for solving pattern recognition problems in artificial intelligence systems [29], we chose Radon Transform, in the form:

$$R(\rho,\varphi)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f(x,y)\delta(\rho-x\cdot\cos\varphi-y\cdot\sin\varphi)dx\cdot dy\,, \qquad (8)$$

where *f(x,t)* is a two-dimensional differential chronogram DCS-map of the SHS combustion wave, and all the remaining variables correspond to the designations in Figure 5 and Table 1.

Table 1 – A set of standard Trace transforms T(f(t)) [29]

Equation	Note	Equation	Note
$T_1=\int_0^{\infty} f(t)dt$	Radon transform	$T_{12}=\int_{c^*}^{\infty}\sqrt{r}\,f(t)dt$	*c** signifies the nearst integer to ***c***
$T_2=[\int_0^{\infty}\lvert f(t)\rvert^{\frac{1}{2}}dt\,]^2$	Diffusion law	$T_{13}=\int_{c^*}^{\infty} rf(t)dt$	***t****=(x,y)*
$T_3=[\int_0^{\infty}\lvert f(t)\rvert^{4}dt\,]^{1/4}$	Rayleigh's law	$T_{14}=\int_{c^*}^{\infty} r^2 f(t)dt$	*f(**t**)= f(x,y)*

$T_4=\int_0^{\infty}\lvert f(t)'\rvert dt$	$f(t)'=(t_2-t_1),(t_3-t_2),\ldots(t_n-t_{n-1})$	$T_{15}=$ median$_{t^*}\{f(t^*),\lvert f(t^*)'\rvert^{½}\}$	$f(t^*)=\{f(t_{c^*}),f(t_{c^*+1}),\ldots,f(t_n)\}$
$T_5=$ median$_t\{f(t),\lvert f(t)\rvert\}$	Weighted median	$T_{16}=$ median$_{t^*}\{f(t^*),\lvert f(t^*)'\rvert^{½}\}$	l=c*,c*+1,…,n;
$T_6=$ median$_t\{f(t),\lvert f(t)'\rvert\}$	Median	$T_{17}=\lvert\int_{c^*}^{\infty}e^{i4\log(r)}\sqrt{r}\,f(t)dt\rvert$	$c=$median$_{t^*}\{l,\lvert f(t)\rvert^{½}\}$
$T_7=[\int_0^{\frac{n}{2}}\lvert F\{f(t)\}(t)\rvert^4 dt]^{¼}$	F – discrete Fourier Transform	$T_{18}=\lvert\int_{c^*}^{\infty}e^{i3\log(r)}f(t)dt\rvert$	
$T_8=\int_0^{\frac{n}{2}}\lvert\frac{d}{dt}M\{f(t)\}\rvert dt$	M –median over a length 3 window	$T_{19}=\lvert\int_{c^*}^{\infty}e^{i5\log(r)}rf(t)dt\rvert$	
$T_9=\int_0^{\infty}rf(t)dt$	$(\frac{d}{dt})$ difference	$T_{20}=\int_c^{\infty}\sqrt{r}\,f(t)dt$	$r=\lvert l-c\rvert;l=1,2,\ldots,n;$
$T_{10}=$median$_t\{l,\lvert f(t)'\rvert^{½}\}$	of successive samples	$T_{21}=\int_c^{\infty}rf(t)dt$	$c=\frac{1}{S}\int_0^{\infty}l\lvert f(t)\rvert dr;$
$T_{11}=\int_0^{\infty}r^2f(t)dt$	$r=\lvert l-c\rvert;l=1,2,\ldots,n;$ $c=$median$_t\{l,f(t)\}$	$T_{22}=\int_c^{\infty}r^2f(t)dt$	$S=\int_0^{\infty}\lvert f(t)\rvert dr$

The results of a computer experiment for determining the scale and shear invariance of the Trace transform of a two-dimensional chronogram of the propagation of a wave of self-propagating high-temperature fusion (SHS) in an unstable spin combustion mode are presented [7, 8]. Model chronograms were taken in the form of four sets of isocline lines, the slope of which corresponded to the value of the tangential velocity from 16.5 to 41.8 m/s, selected based on the analysis of high-speed video recording of the combustion wave in the Ni-Al system [12].

The range of isocline slopes (4, 6, 8 and 10 degrees), in which stable spin combustion in the Ni-Al system was modeled, corresponds to the theoretical values of the tangential spin combustion velocity component in the range from 16.5 to 41.8 m/s, registration which are not yet available for experimental observation, as shown in Figure 6.

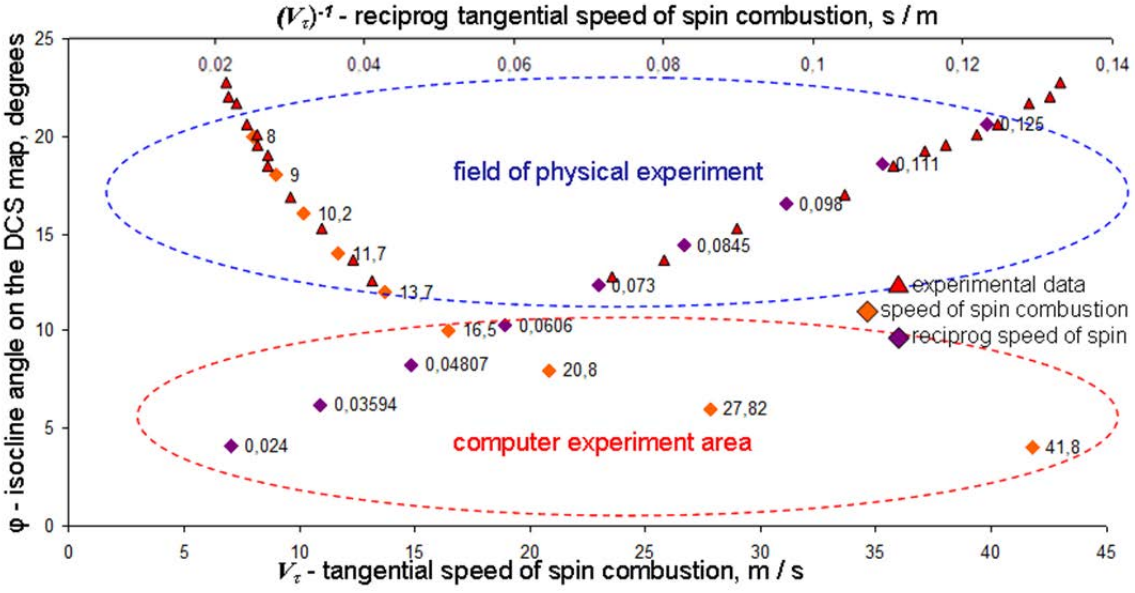


Figure 6. Choice of the domain for determining the parameters of the DSC model of spin combustion

The planning of the experiment is shown in Figure 7a, which shows examples of partitioning into analysis windows W1, W2, W3, W4 of "reference" phantoms from (ideal) DCS chronograms – differential chronoscopy maps [24, 26, 28].

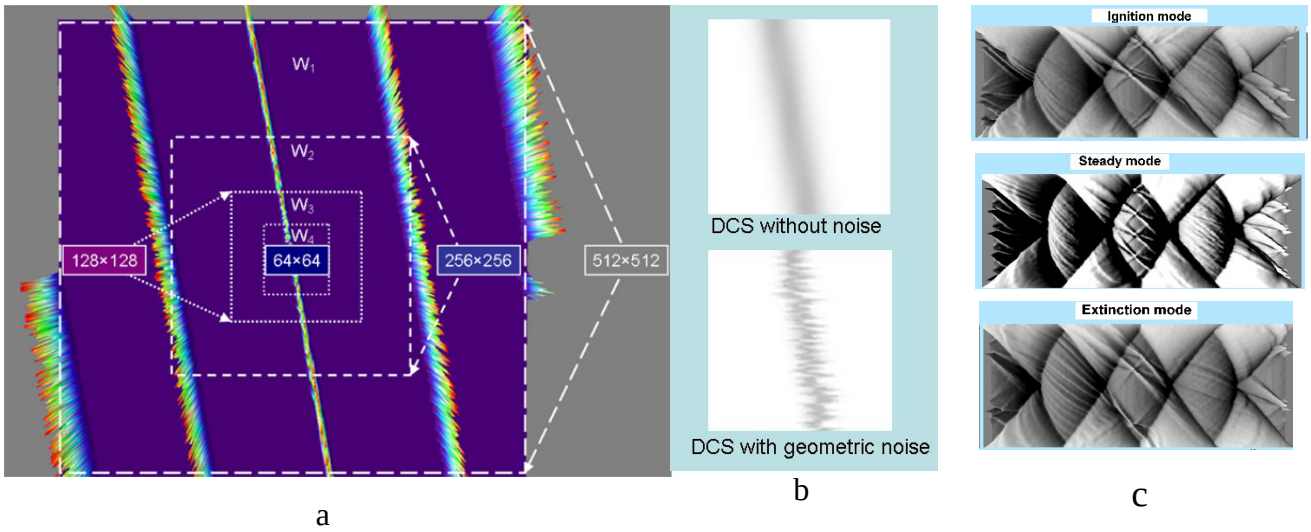


Figure 7. Stages of planning a computer experiment and the model of the DCS-map of spin combustion: a – analysis windows with a change in scale; b – DCS isoclines with and without noise; Trace-sinograms for identifying signs of instability of spin combustion

We have used the property of “ideal” spin combustion (7), for which the DCS chronogram is a family of isoclines. The angle of inclination of the isocline corresponds to the speed and direction of spin combustion: counterclockwise or clockwise "right" or "left" screw sign is determined by the "gimlet" rule. Figure 7b shows an example of an ideal DCS phantom isocline, and below with geometric noise. In the experiment, the noise/signal ratio was taken equal to 1:1 (i.e., the thickness of the “isoclinic” line is equal to the value of the dispersion of the random deviation).

Results and discussion

An indicator of spin instability can be the deviation of the i-th node of the sinogram from the median symmetry axis C by the angular value φ_i (see Fig.5b). The Triple trace-feature can be given in the form $\Pi=\Sigma(\varphi_i \times \rho_j)$, where ρ_j is the statistical weight of the local maximum A_i or B_i in the histogram of the corresponding diametral functional P (Fig.5c).

The scale invariance was checked using a test set of chronograms corresponding to four values of the optical magnification factor when recording a combustion wave: ×1, ×2, ×4, ×8.

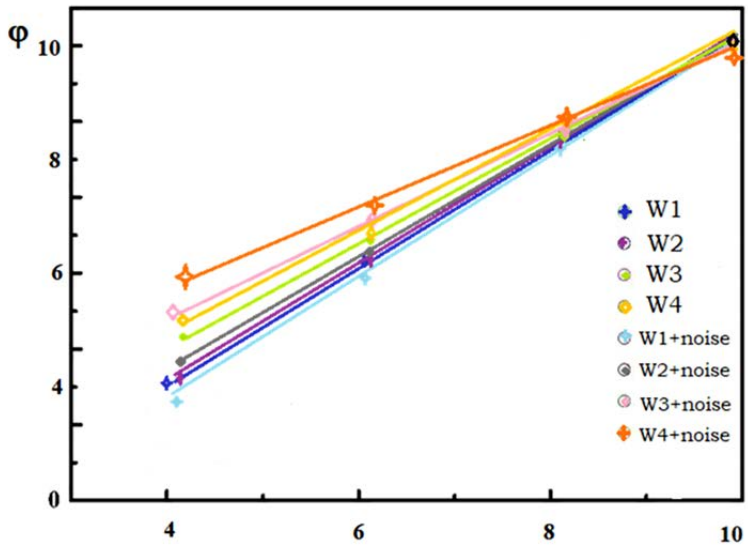
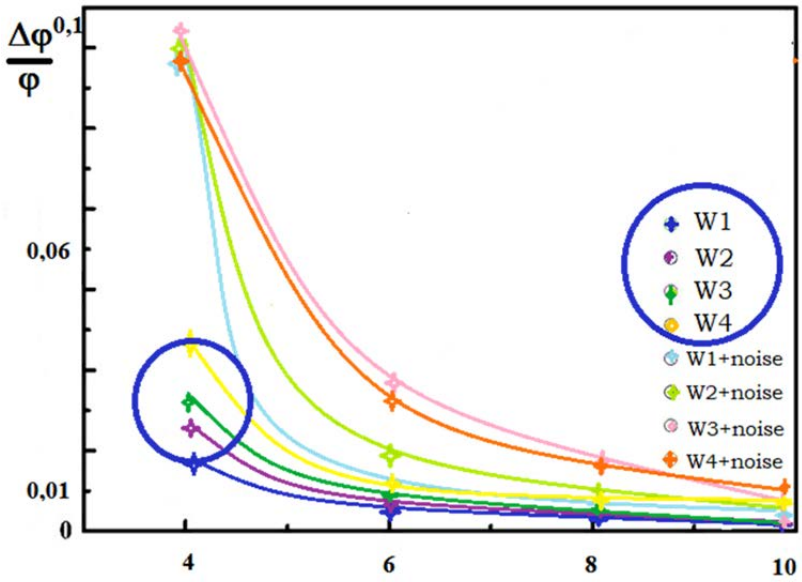


Figure 8. Verification of the Scale Invariance Properties of the Spin Instability Trace Criterion.

The scale invariance has a multiplicative error that is a multiple of the magnification factor of the optical field of view: $\Delta\varphi=k\,\Delta\varphi_0$

The influence of the random nature of the formation of the combustion front was taken into account by introducing additive geometric noise at the level of -20 dB into the chronogram model, as can be seen in Figure 9.



Scale of analysis windows when zooming:

W_1 (512x512) k= 1:1

W_2 (256x256) k= 1:2

W_3 (128x128) k= 1:4

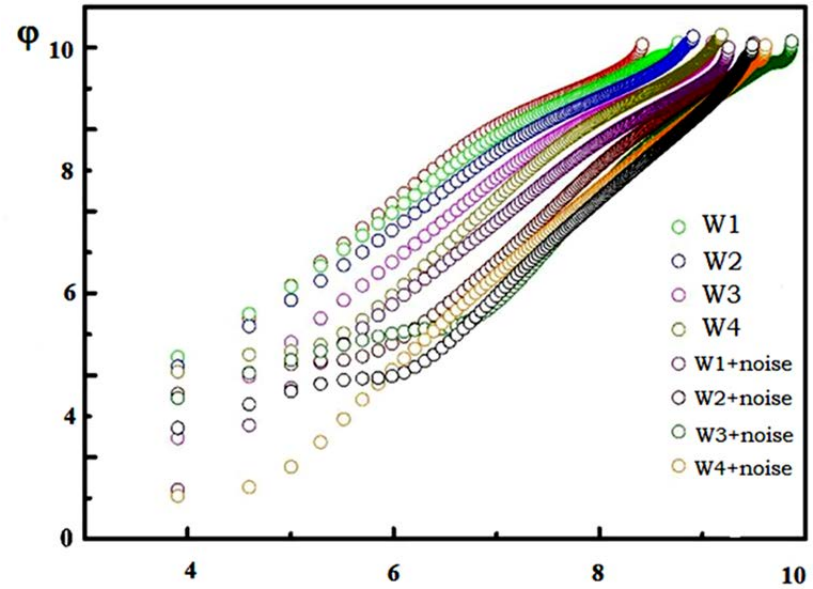
W_4 (64x64) k= 1:8

Noise

±12 pixel

Figure 9. The value of the relative error in measuring the angle of inclination of the DCS isoclines

Time shift invariance was tested at four chronogram delay intervals or shifts by the corresponding number of image pixels: 4 (2 ms), 8 (4 ms), 16 (8 ms), 32 (16 ms), as seen in Figure 10.



DCS shift amount:

W_1 (512x512) Δ= 32 (16ms)

W_2 (256x256) Δ= 16 (8ms)

W_3 (128x128) Δ= 8 (4ms)

W_4 (64x64) Δ=4 (2ms),

The shift invariance has a constant additive error in the analysis window W_i:

$\Delta\varphi=const\ (W_i)$

Figure 10. Verification of the Shift Invariance Properties of the Spin Instability Trace Criterion

A high degree of shift invariance of trace-transformation nodes is shown, which is limited only by the presence of additive geometric noise in the original image of the combustion wave.

Conclusions

1. A high degree of invariance to the shift of the Trace-transformation nodes is shown, the error in determining the coordinates of which is limited only by the presence of the initial additive geometric noise $\Delta\varphi_0$ in the image of the differential chronogram of the combustion wave (provided: $\Delta\varphi_0$ = const) [24, 26, 28].

2. The scale invariance of the Trace-features with a change in k (the magnification factor of the optical system) remains on the average ($<\varphi>$), and the error in determining the angular coordinates of the nodal points of the Trace transform increases with a scale increase: $\Delta\varphi = k \cdot \Delta\varphi_0$, where $\Delta\varphi_0$ is the error at $k = 1$.

3. Scaling is possible up to the limiting value of the optical magnification factor of the microscope $k = <\varphi>/\Delta\varphi_0$, where $<\varphi>$ is the average tilt angle of the DCS isocline, which in practice provides a dynamic magnification range of 40 dB.

Acknowledgments

This study was partially funded by a scholarship from the Novosibirsk City Hall (by the City Hall resolution of August 24, 2020 N 2587).

References

1. Effect of plasma spraying regimes on structure and properties of Ni_3Al coatings / E. E. Kornienko, D. O. Mul', O. A. Rubtsova [et al.]. – DOI 10.1134/S0869864316060147 // Thermophysics and Aeromechanics. – 2016. – Vol. 23. – № 6. – P. 919–927.

2. Cold spraying of aluminum bronze on profiled submillimeter cermet structures formed by laser cladding / N. S. Ryashin, A. G. Malikov, V. S. Shikalov [et al.]. – DOI 10.1063/1.5007495 // Proceedings of the XXV Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter (HEPCM 2017) : Dedicated to the 60th anniversary of the Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Electronic resource): AIP Conference Proceedings, Novosibirsk, 05-09.06.2017 / editors V. Fomin. – Novosibirsk : AIP Publishing, 2017. – P. 030037.

3. Development prospects of SHS technologies in Altai state technical university / V. V. Evstigneev, P. J. Guljaev, I. V. Miljukova [et al.] // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2006. – Vol. 15, № 1. – P. 99–104.

4. Thermal analysis of reaction producing K_XTiO_2 / K. Borodina, S. Sorokina, N. Blinova [et al.]. – DOI 10.1007/s10973-017-6840-0 // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2018. – Vol. 131, № 1. – P. 561–566.

5. Cui, H. Z. Influence of micropores on structural instability of the combustion wave / H. Z. Cui, A. A. Grigoryevskaya, P. Yu. Gulyaev. – DOI 10.17816/byusu20190433-40 // Yugra State University Bulletin. – 2019. – № 4 (55). – P. 33–40.

6. Dolmatov, A. V. Thermal imaging complex with tracking function for joint research of microheterogeneous processes and macrokinetics of SHS phenomenon / A. V. Dolmatov, P. Y. Gulyaev. – DOI 10.1088/1742-6596/1333/6/062006 // Journal of Physics: Conference Series : International Conference «Information Technologies in Business and Industry», Novosibirsk, 13-15.02.2019. – Novosibirsk : Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 062006.

7. Бороненко, М. П. Телевизионная измерительная система наносекундного разрешения / М. П. Бороненко, П. Ю. Гуляев. – Текст : непосредственный // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 1(31). – С. 60–64.

8. Increasing the noise immunity of optical-electronic systems based on video cameras with an optical converter / M. P. Boronenko, P. Yu. Gulyaev, A. E. Seregin, K. G. Poluhina. – DOI 10.1088/1742-6596/643/1/012028 // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 643. – P. 012028.

9. Экспериментальное исследование характеристик топливных струй / А. Е. Свистула, Д. Д. Матиевский, П. Ю. Гуляев, А. В. Еськов. – Текст : непосредственный // Двигателестроение. – 1999. – № 1. – С. 29–31.

10. Измерение скорости и температуры частиц в потоке низкотемпературной плазмы / М. П. Бороненко, И. П. Гуляев, П. Ю. Гуляев, А. Е. Серегин. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57, № 3-2. – С. 70–73.

11. Gulyaev, P. Instability of the Ni-Al combustion wave in the Zeldovich-Barenblatt parameters / P. Gulyaev, A. Dolmatov, V. Jordan. – DOI 10.1088/1742-6596/1353/1/012036 // Journal of Physics: Conference Series : International Conference «High-Tech and Innovations in Research and Manufacturing» HIRM 2019, Krasnoyarsk, 06.05.2019. – Krasnoyarsk : Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012036.

12. Boronenko, M. High-speed visualization of combustion synthesis discrete reaction waves: Coherent heat microstructures / M. Boronenko, P. Gulyaev, A. Dolmatov. – DOI 10.1088/1742-6596/1115/4/042021 // Journal of Physics: Conference Series, Tomsk, 16-22.09.2018. – Tomsk : Institute of Physics Publishing, 2018. – P. 042021.

13. Optical-ectronic system for diagnostics of two-phase flows by dynamic particles count method / P.Yu. Gulyaev, V.I. Iordan, I.P. Gulyaev [et al.] // Russian Physics Journal. – 2008. – Vol. 51. – № 9-3. – P. 79–87.

14. Analysis and optimization of gas-thermal spray process in terms of condensed phase velocity and temperature / A. V. Dolmatov, I. P. Gulyaev, E.A. Lyskov [et al.]. – DOI: 10.1134/S0869864317010097 // Thermophysics and Aeromechanics. – 2017. – Vol. 24 (1). – P. 83–94.

15. Limit of inert functional admixtures depending on the dispersion in the combustion synthesis of nickel aluminides / P. Gulyaev, A. Dolmatov, V. Jordan, Y. Panchenko. – DOI: 10.1088/1742-6596/1134/1/012018 // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1134. – P. 012018.

16. Wien"s criterion for choosing the parameters for reducingtion of the temperature distribution of particles by their total thermal spectrum / P. Yu. Gulyaev, V. I. Iordan, I. P. Gulyaev [et al.] // Russian Physics Journal. – 2008. – Vol. 51, № 9-3. – P. 69–76.

17. Иордан, В.И. Разрешающая способность виртуальных приборов контроля температуры частиц в плазменных потоках по суммарному спектру / В. И. Иордан. – Текст : непосредственный // Ползуновский альманах. – 2008. – № 2. –С. 13–14.

18. Ivleva, T. P. Three-dimensional modes of unsteady solid-flame combustion / T. P. Ivleva, A. G. Merzhanov. – DOI 10.1063/1.1540772 // Chaos (Woodbury, N.Y.). – 2003. – Vol. 13, № 1. – P. 80–86.

19. Гуляев, П. Ю. Моделирование технологических процессов плазменного напыления покрытий наноразмерной толщины / П. Ю. Гуляев, И. П. Гуляев. – Текст : непосредственный // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – Т. 35, № 1.1. – С. 144–148.

20. Моделирование фрактальных структур упаковок порошковых СВС-материалов / И. В. Милюкова, А. Л. Трифонов, С. А. Ширяев [и др.]. – Текст : непосредственный // Ползуновский альманах. – 2007. – № 3. – С. 39–41.

21. Гуляев, П. Ю. Байесовское восстановление цвета цифровых изображений / П. Ю. Гуляев, Ю. П. Гуляев, А. В. Долматов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 1997. – № 2. – С. 114–115.

22. Dolmatov, A. V. Investigation of structure formation in thin films by means of optical pyrometry / A. V. Dolmatov, I. V. Milyukova, P. Y. Gulyaev. – DOI: 10.1088/1742-6596/1281/1/012010 // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1281. – P. 012010.

23. Gulyaev, P. Trace-Analysis of Images of the Differential Chronogram of the Combustion Wave for Recognition of Transitional Modes of SHS / P. Gulyaev, V. Jordan // CEUR Workshop Proceedings: Optoelectronic equipment and devices in systems of pattern recognition, image and symbol information processing. Recognition. – 2017. – Vol. 1940. – P. 37–44.

24. Gulyaev, P. Experimental Observation of the Instability Mode in the Combustion Wave by the Differential Chronoscopy Method / P. Gulyaev, A. Grigoryevskaya, V. Jordan. – DOI:

10.1109/EFRE47760.2020.9241952 // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2020). – 2020. – P. 1227–1231.

25. Григорьевская, А. А. Компьютерная визуализация радиационного теплопереноса в волне горения СВС / А. А. Григорьевская, П. Ю. Гуляев. – Текст : непосредственный // Ползуновский альманах. – 2019. – № 4. – С. 5–9.

26. Григорьевская, А. А. Компьютерный эксперимент верификации инвариантных свойств Trace-критерия спиновой неустойчивости движения фронта горения / А. А. Григорьевская. – Текст : непосредственный // Математика : материалы LIX Международной научной студенческой конференции. – Новосибирск : ИПУ НГУ, 2021. – С. 94–95.

27. Зельдович, Я. Б. Теория горения и детонации газов / Я. Б. Зельдович. – Москва ; Ленинград : АН СССР, 1944. 71 с. – Текст : непосредственный.

28. Grigoryevskaya A., Jordan V., Shmakov I., Gulyaev P. Criteria for spin instability based on the node distribution in Trace-transform of the SHS combustion wave chronogram //Journal of Physics:Conference Series.- 2021.- Vol. 1745.- C. 012065.

29. Kadyrov, A. The Trace transform and its applications / A. Kadyrov, M. Petrou // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2001. – Vol. 23. – P. 811–828.

30. Barenblatt, G. I. On thermal-diffusive stability of a laminar flame / G. I. Barenblatt, Ya. B. Zel'Dovich, A. G. Istratov // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 1962. – Vol. 4. – P. 21–26.

31. Lam, F. Front roughening of flames in discrete media / F. Lam, X.C. Mi, A. J. Higgins. – DOI: 10.1103/PhysRevE.96.013107 // Physical Review E. – 2017. – Vol. 96. – Iss. 1. – P. 013107.

32. Micro-heterogeneous regimes for gasless combustion of composite materials / J. M. Pauls, C. E. Shuck, A. S. Mukasyan, A. S. Rogachev. – DOI 10.1080/00102202.2017.1417269 // Combustion Science and Technology. – 2018. – Vol. 190, № 5. – P. 893–908.

33. Bharat, N. T. Effect of Heat Loss on Propagation Limits of Combustion Fronts / N. T. Bharat, D. P. Mishra, M. K. Gundawar // Combustion Science and Technology. – 2020. – Vol. 192 (3). – P. 391–415.

34. Мержанов, А. Г. Новые явления при горении конденсированных систем / А. Г. Мержанов, А. К. Филоненко, И. П. Боровинская. – Текст : непосредственный // Доклады Академии наук СССР. – 1973. – Т. 208. – С. 829.

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 г. Выпуск 1 (64). С. 21–31

УДК 669:546.6
DOI: 10.18822/byusu20220121-31

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ С ФОТОТЕРМИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Касьяненко Екатерина Михайловна
научный сотрудник
ФГУ «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и Фотоника» Российской академии наук»
Москва, Россия
E-mail: ekkassianenko@gmail.com

Омельченко Александр Иванович
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
ФГУ «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и Фотоника» Российской академии наук»
Москва, Россия
ORCID: 0000-0001-8546-8187
E-mail: alexio1954@mail.ru

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

В работе выполнена оптическая когерентная томография (ОКТ) гелевых фантомов и хрящевой ткани сустава, импрегнированных наночастицами, при лазерном воздействии эрбиевого волоконного лазера с длиной волны 1,56 мкм. Многофункциональные наночастицы магнетита стабилизированные крахмалом получены методом соосаждения водного раствора солей, а оксидные бронзы K_xTiO_2 и Na_xTiO_2 формируются в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и механоактивации. Показано улучшение эффективности диагностического метода путем введения просветляющих добавок и поглощающих наночастиц за счет снижения интенсивности облучения и увеличения фототермического эффекта. Данные ОКТ эластографии указывают на зависимость деформации тканей от предварительной истории воздействия на ткань.

Ключевые слова: оптическая диагностика, наночастицы, фототермический эффект, лазерное воздействие, биоткань, эластография.

DEFORMATIONS OF BIOLOGICAL TISSUES WITH PHOTOTHERMAL NANOPARTICLES UNDER LASER IRRADIATION

Ekaterina M. Kasyanenko
Researcher, Institute of the Photon Technologies of Federal Scientific Research Centre «Crystallography and Photonics» of RAS,
Moscow, Russia
E-mail: ekkassianenko@gmail.com

Alexander I. Omelchenko
Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Senior Researcher,
Institute of Photon Technologies of Federal Scientific Research Centre
«Crystallography and Photonics» of RAS
SPIN ID: 5134-5353
ORCID: 0000-0001-8546-8187
E-mail: alexio1954@mail.ru

In this work, optical coherence tomography (OCT) of gel phantoms and cartilage tissue of the joint impregnated with nanoparticles was performed under laser exposure to an erbium fiber laser with a wavelength of 1.56 μm. Multifunctional magnetite nanoparticles stabilized by starch obtained by co-precipitation of an aqueous solution of salts, and oxide bronzes K_xTiO_2 and Na_xTiO_2 are formed in the processes of self-propagating high-temperature synthesis and mechanical activation. An improvement in the efficiency of the diagnostic method by introducing antireflection additives and absorbing nanoparticles due to a decrease in the irradiation intensity and an increase in the photothermal effect is shown. OCT elastography data indicate the dependence of tissue deformation on the preliminary history of tissue exposure.

Keywords: optical diagnostics, nanoparticles, photothermal effect, laser impact, biotissue, elastography.

Введение

В настоящее время среди методов оптических исследований слабопоглощающих сред [1, 2] наиболее быстро развиваются методы оптической когерентной томографии (ОКТ) [3], которые широко применяются для неинвазивной диагностики биотканей [4]. В области лазерной медицины с помощью ОКТ проводят исследования структуры с высоким пространственно-временным разрешением, обычно ~10-15 мкм по пространству и ~100 мкс по времени [5-6]. В настоящее время максимальная глубина, достигнутая при зондировании мягких тканей, составляет 3 мм [7,8]. Этого достаточно для исследования внутренней структуры и оптических свойств полупрозрачных тканей различных органов на глубине до 3 мм [9]. Толщина хрящевой пластинки сустава обычно не более 1-2 мм, а дефекты хряща: каверны, узуры и раковины и др. – обычно располагаются в толще хрящевой пластины и могут быть обнаружены только с помощью ОКТ [10]. Импрегнация в сустав фотопоглощающих наночастиц и оптимизация режима облучения позволяют повысить эффективность и безопасность лазерного лечения [11-13]. Разработка оптической неинвазивной диагностики повреждений хряща позволит ускорить введение метода в клиническую практику. Введение в ткань наночастиц, обладающих фототермическим эффектом, позволит использовать щадящие режимы облучения и локализовать область лазерного воздействия при медицинских операциях, указанных выше. Более того, подобные наночастицы могут служить маркером повреждения хрящевой ткани, так как ранее было доказано, что здоровая хрящевая ткань устойчива к прониканию в нее каких-либо частиц [6], а наночастицы оседают именно в местах различных повреждений или травм [7].

Цель работы – сравнить величину фотоупругой деформации фантомов биологических тканей под воздействием лазерного излучения при пропитке образцов разными типами контрастирующих наночастиц для дальнейшего их применения в методах ОКТ-диагностики и лазерной термотерапии артрита.

Современное состояние методов исследований

Оптическая диагностика с использованием контрастирующих веществ в биологических тканях используется в настоящее время в различных областях биологии и медицины. Она

применяется для выявления мест локализации опухоли в онкологии. В ангиологии железооксидные магнитные частицы используются при проведении ангиографических исследований при атеросклерозе [14].

Интерференционные методы использовались при изучении доставки лекарств в мягкие ткани [15]. Неинвазивная ОКТ-диагностика в основном применяется при исследовании патологии, расположенной вблизи поверхности ткани (от 1 до 3 мм), например в коже или под слизистой полости горла [16, 17]. В хрящевых тканях, без введения контрастирующих веществ, ОКТ применялась при исследовании упорядоченных структур коллагена в межпозвонковых дисках [18], в офтальмологии – при исследовании неабляционного лазерного воздействия на ткани глаза [19]. С помощью ОКТ проводилось исследование недеструктивного лазерного воздействия на склеру и роговицу [19, 20]. В результате были определены оптимальные режимы лазерного воздействия на ткани глаза для изменения их механических свойств [20-23]. Поляризационно-чувствительная ОКТ применялась в офтальмологии для исследования тонких структур тканей глаза в трабекулярной области [21].

В последнее время в работах авторов проекта получила развитие оптическая когерентная эластография [22], с помощью, которой изучались относительные деформации хрящевых тканей и тканей глаза при неабляционном воздействии лазерного излучения. Таким образом, метод ОКТ, обладая высоким разрешением, используется в медицине для обнаружения тонких структур тканей, находящихся на небольшом расстоянии от поверхности, в глубину не более 3 мм.

В литературе известно изготовление 20-30 нм наночастиц магнетита в золотой оболочке [23]. Получение таких частиц связано с определенными трудностями поддержания режимов синтеза, относящихся к тонкой химической технологии, а также требующих дорогих расходных материалов и химических веществ. Также известно изготовление наночастиц оксидов железа методом лазерной абляции в жидкости (PLAL) [24, 25]. Этот метод отличается простотой, химической чистотой и не требует сложных материалов. В результате абляции получаются монодисперсные коллоидные растворы наночастиц железа и оксидов со структурой «ядро-оболочка», отличающиеся стабильностью [25]. Монодисперсные железооксидные наночастицы структуры «ядро-оболочка» размером 10-20 нм в золотой оболочке методом одномоментной PLAL до настоящего времени не получены.

Было установлено увеличения питания и, следовательно, регенерации хрящевой ткани при терапевтическом импульсно-периодическом лазерном воздействии на гиалиновый хрящ суставной поверхности, такое воздействие приводит к образованию пор субмикронного размера [26]. Использование лазерного воздействия с определенной частотой повторения импульсов и интенсивностью на искуственно изогнутый хрящ в определенные области с повышенным внутренним напряжением способно стабилизировать новую форму хрящевой ткани и имплантата [27-28]. Подобное воздействие на ткани может привести к повреждению ее матрикса и клеток, следовательно, и к дальнейшему лизису ткани после имплантации, поэтому для успешного применения в медицинской практике требуют минимизации травмирующего влияния на клетки и структуры хрящевой ткани.

Исследования на хрящевой ткани с наночастицами магнетита Fe_3O_4, установили [29], что пропитка хрящевой гиалиновой ткани их растворами увеличивает скорость нагрева при импульсно-периодическом лазерном воздействии эрбиевым волоконным лазером. А исследования на наночастицах металлооксидных бронз (Na_xTiO_2, K_xMoO_3, K_xWO_3, H_xMoO_3, где $0,1 < x < 0,3$) обнаружили, что импрегнация ткани наночастицами $Na_{0.2}TiO_2$ и $K_{0.1}MoO_3$ изменяет скорость нагрева, остальные наночастицы не вносят дополнительного фототермического эффекта [30]. Дальнейшие работы было решено проводить с использованием наночастиц магнетита Fe_3O_4 и металлооксидных бронз $Na_{0.2}TiO_2$, так как они обладают магнитными свойствами [31-32].

Для описаных ранее технологий по изменению формы и регенерации хрящевой ткани контроль достижения необходимых изменений осуществляется термометрическим способом. В виду того что хрящевая ткань не является однородным материалом, а состоит из неодно-

родностей с различной степенью нагрева, а так же максимум температуры при лазерном нагреве находится не на поверхности ткани, это влечет за собой ошибку при контроле температуры на поверхности биоткани.

Методика исследования

Исследование проводилось с использованием двух типов наночастиц: наночастицы магнетита Fe_3O_4, синтезированы в лаборатории биофотоники ИФТ ФНИЦ «Кристаллография и Фотоника» РАН методом соосаждения водного раствора солей $FeCl_2$ и $FeCl_3$ с добавлением основания в атмосфере инертного газа при комнатной температуре [33] и наночастицы металлооксидной бронзы оксида титана $Na_{0.2}TiO_2$, произведенные методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [34]. Подготовка растворов наночастиц из порошков проводилась перед созданием полиакриламидных гидрогелей. Водные растворы наночастицс размером порядка 10-20 нм использовались для пропитки образцов хрящевой ткани и биофантомов.

В работе использовалась установка ОКТ-эластографии, созданная в Институте прикладной физики РАН, Нижний Новгород, группой под руководством Владимира Юрьевича Зайцева, с областью визуализации 4 мм в ширину и 2 мм в глубину, позволяющая получить зависимость внутренних деформаций от времени. Данная установка позволяла оценивать и визуализировать упругие свойства ткани и деформационные процессы на глубине порядка 1-2 миллиметров [35-36].

Предварительные исследования проводились на фантомах биологической ткани - специально подобранные полиакриламидные гидрогели (ПААГ) моделирующие температурные свойства и однородную структуру хрящевой ткани. Гели создавались на базе раствора наночастиц заданной концентрации, что позволяло достичь одинаковой концентрации и распределения по фантому наночастиц $Na_{0.2}TiO_2$ и Fe_3O_4.

Общий вид экспериментального стенда приведен на рисунке 1. В качестве биологического объекта использовались срезы гиалинового хряща свиньи, полученные с бойни.

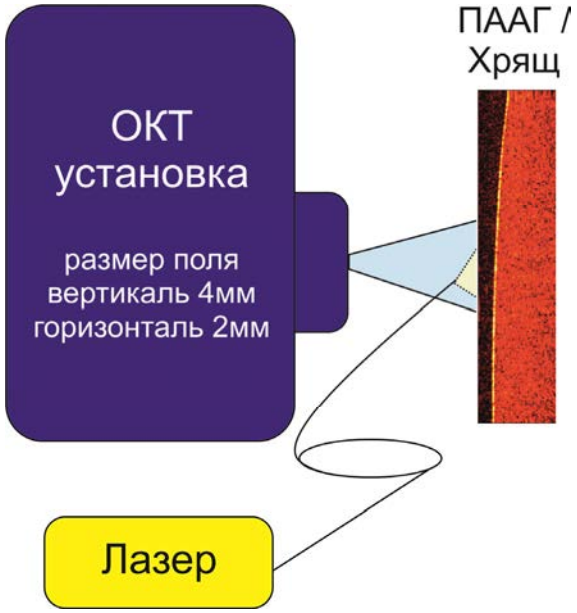


Рисунок 1. Схема экспериментального исследования

Образцы подготавливались при помощи специальных резаков, позволяющих получить образцы одинакового размера и массы, после извлечения хранились в физиологическом растворе не более четырех дней при температуре 2° С. Предварительно, перед пропиткой растворами наночастиц образцы подвергались лазерной обработке в заданых режимах [26]. Также часть образцов оставалась нетронутой, интактной и служила контролем.

Во всех случаях облучение проводилось с помощью эрбиевого волоконного лазера с длиной волны 1,56 мкм в импульсно-периодическом режиме. Для хрящевой ткани эксперимент был проведен с концентрацией наночастиц 1мг/мл, импрегнация под действием направленного магнитного поля.

Результаты эксперимента

В результате проведенных исследований были получены картины внутренних напряжений ПААГ («пустых» и с наночастицами) при лазерном воздействии эрбиевым волоконным лазером в импульсно переодическом режиме и графики амплитуды внутренних напряжений ткани при удалении от оси лазерного излучения вдоль поверхности (рисунок 3). Обработка велась узкими областями со смещением вдоль поверхности по ширине от оси лазерного излучения на одинаковые промежутки.

Анализ полученных графиков показал увеличение ширины распространения деформации для образцов с наночастицами металлооксидных бронз натрий титана, а также увеличение амплитуды деформации растяжения на 50% по сравнению с «пустыми» ПААГ. ПААГ с наночастицами магнетита при ОКТ-эластографии образцов давали «засветы» и искажение картины деформаций, а также частые разрывы поверхности ПААГ, которые на графике деформаций выражаются резким скачком амплитуды например на рисунке 3 с в области 30 секунд и рисунок 2 b. Для исследования на хрящевой ткани было решено провести уменьшение концентрации наночастиц.

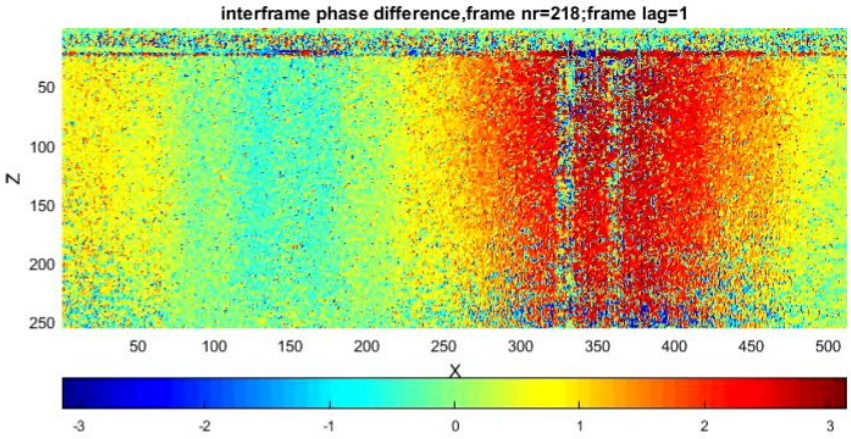
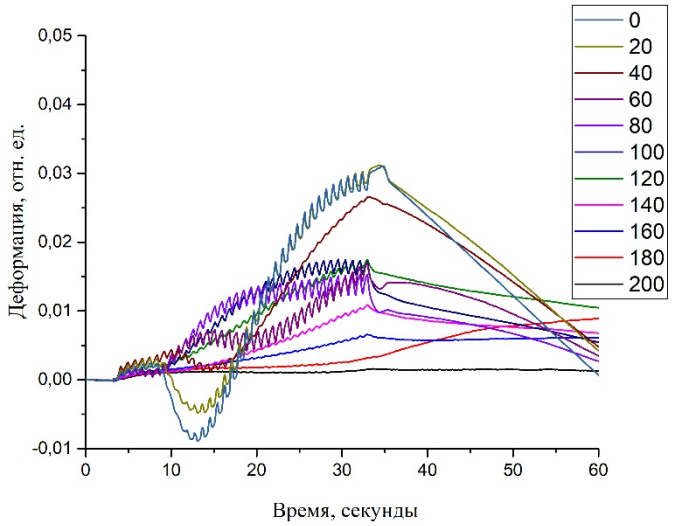


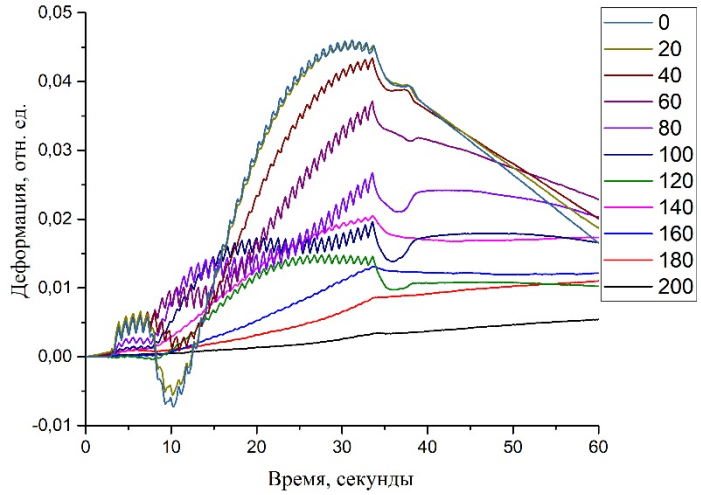
Рисунок 2. «Засветы» на картине межкадровой разности фаз при исследовании ПААГ с магнетитом

Магнитные свойства коллоидных растворов наночастиц оксидов железа исследовались с помощью неоднородного магнитного поля и оптической микроскопии. Динамику взаимодействующих частиц в коллоидном растворе, содержащем наночастицы с широким распределением по размерам от 100 нм до 10 мкм, наблюдали с помощью оптического микроскопа ПОЛАР1, МикроМед. Наночастицы, используемые для визуализации, были помещены в сахарный раствор с вязкостью, равной вязкости синовиальной жидкости и наблюдали на просвет при увеличении х20 и числовой апертурой 0.25. Это позволяло визуализировать наночастицы размером вплоть до 1 ÷10 мкм.

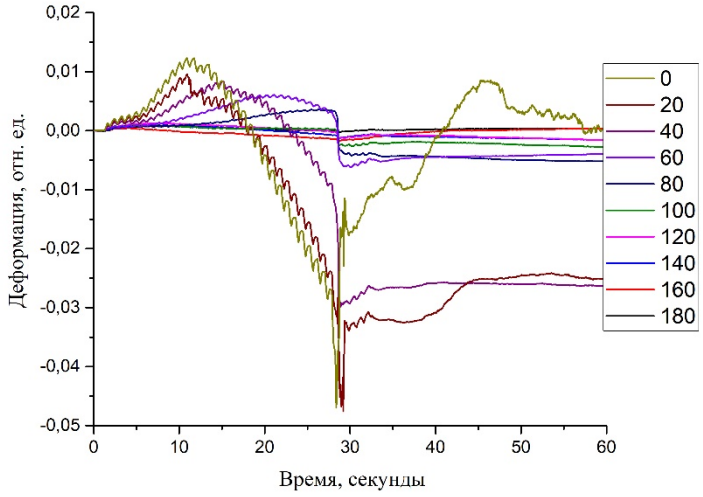
Так как, для увеличения вязкости в коллоидные растворы наночастиц был добавлен сахар, в поляризованном свете визуально были видны наночастицы размером менее 1 мкм. Это позволило наблюдать динамику броуновского движения наночастиц непосредственно при воздействии неоднородного магнитного поля и в случае его отсутствия.



a



b



c

Рисунок 3. Графики внутренних деформаций при удалении от оси лазерного воздействия для: a – «пустого» ПААГ, b – ПААГ с наночастицами $Na_{0.2}TiO_2$, c – ПААГ с наночастицами магнетита

На рисунке 4 демонстрируется динамика броуновского движения наночастиц. На последовательных кадрах, снятых с интервалом 1 сек, видны смещения наночастиц в коллоидном растворе. На рисунке 4e показаны агломераты наночастиц, образовавшиеся при наложении магнитного поля с градиентом 100 Т/м индукцией 0.1 Т.

Наночастицы магнетита в процессе съемки совершали броуновское движение: крупные частицы размером до 10 мкм двигались медленно, а самые малые, менее 1 мкм, двигались достаточно быстро и меняли свою траекторию движения не менее, чем 1 раз в сек. С помощью видеосъемки удалось зарегистрировать динамику движения наночастиц с частотой захвата кадров 50 Гц.

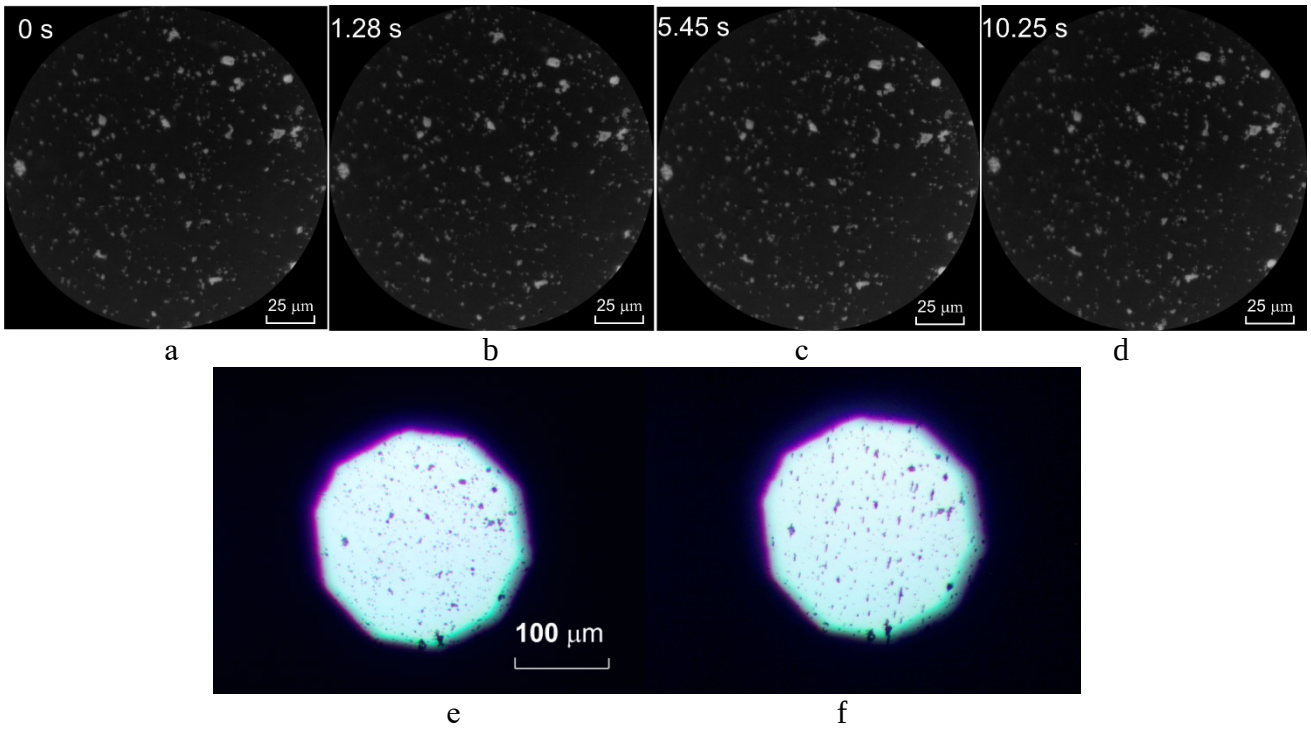


Рисунок 4. Изображение наночастиц магнетита, полученное с помощью видеокамеры ToupCam в оптическом микроскопе Микромед. : (a-d) – динамика броуновского движения наночастиц, (e,f) – моментальное распределение наночастиц (e)- без магнитного поля, (f) – с магнитным полем.

При исследовании методом ОКТ-эластографии образцов хрящевой ткани, пропитанной наночастицами магнетита в концентрации 1мг/мл, были получены временные зависимости межкадровой деформации при лазерном воздействии. Анализ картин деформаций ткани при первом лазерном импульсе выявил тот факт, что разницы между распространением деформации в интактной ткани и ткани после импрегнации практически нет, что подтверждает сложность проникновения наночастиц в свежую/интактную хрящевую ткань. При анализе картин накопленного напряжения за время лазерного воздействия на ткань после лазерной модификации + пропитка магнетитом и интактной ткани после пропитке магнетитом были выявлены явные различия (см. рис. 5). Для ткани после лазерной модификации очевидно нарастание внутренних деформаций и их локализация в месте лазерного воздействия, что свидетельствует о проникновении наночастиц в толщу ткани и влиянии на поглощающую способность хрящевой ткани в местах скопления наночастиц, что дает усиление отклика биоткани на лазерное воздействие.

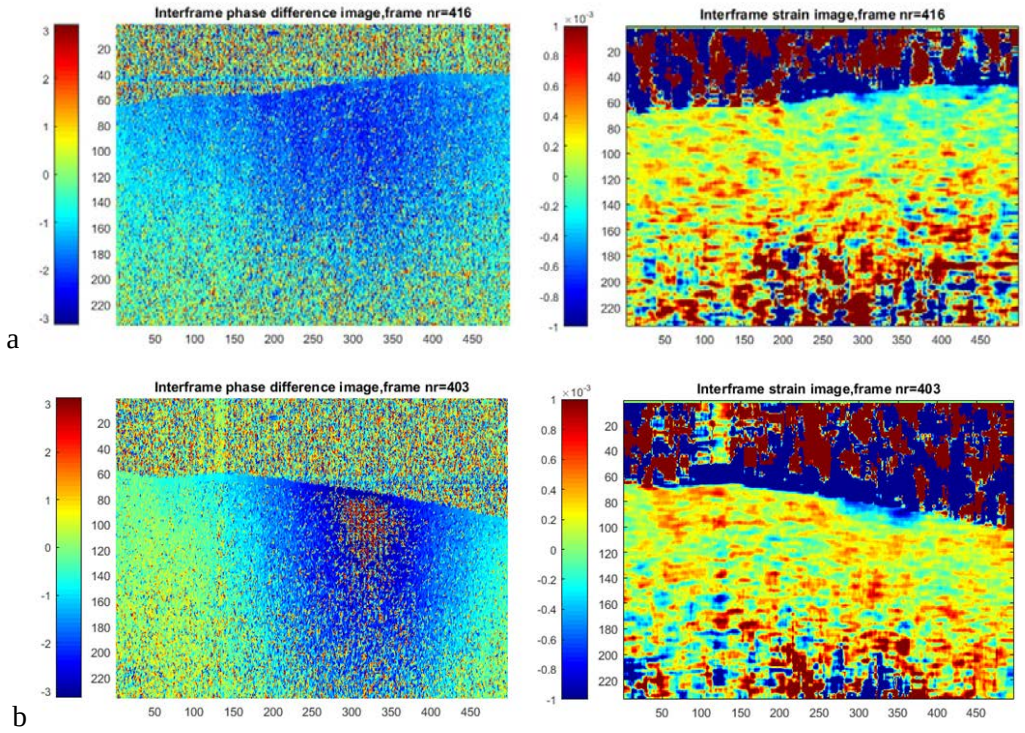


Рисунок 5. Деформационная картина при лазерном импульсе для: a – интактной ткани, b –после лазерного воздействия и пропитки наночастицами.

Обсуждение результатов

При сравнении величины деформаций для пустых ПААГ и гелей с магнетитом и $Na_{0.2}TiO_2$ амплитуда напряжений на равном удалении от центра лазерного воздействия для образцов с магнетитом меньше. Однако разница между максимальным значением сжатия и растяжения для образцов с магнетитом больше. Это является важной особенностью, так как для порообразования при лазерном воздействии, которое в дальнейшем может привести к запуску регенерации, необходимо изменение знака деформаций (сжатие/растяжение) с определенной частотой, при которой создаются знакопеременные поля термонапряжений.

Как видно из результатов оптической микроскопии (Рис. 4) наночастицы магнетита размером 0.1 ÷1мкм движутся в вязкой среде со скоростями до 10 ÷100 мкм/с. Крупные частицы до 10 мкм и более остаются неподвижными ввиду высокой вязкости среды. Движение наночастиц без внешних полей вызвано действием как броуновских сил, так и магнитных сил спонтанно намагниченных крупных частиц. Случайное «блуждание» наночастиц в микрополе крупных частиц возможно обусловлено тепловым движением и случайным распределением спонтанной намагниченностью крупных частиц. При наложении внешнего неоднородного магнитного поля все частицы движутся в направлении градиента поля и выстраиваются вдоль силовых линий.

Картины деформаций при лазерном воздействии на хрящевую интактную ткань – без наночастиц и ткань, пропитанную наночастицами, практически неразличимы, что подтверждает ранее сделанное заключение о том, что хрящевая ткань устойчива к проникновению инородных наноразмерных объектов.

Предварительное лазерное изменение хрящевой ткани приводит к изменению структуры ткани и вероятно делает ее менее устойчивой к проникновению наночастиц, следовательно они проходят в толщу ткани и вносят дополнительный эффект на внутренние напряжения при последующем лазерном воздействии, который и обнаруживается с помощью ОКТ- эластографии. Фототермический эффект лазерного воздействия на ткань с наночастицами вызывает дополнительное термомеханическое стимулирование деформаций и релаксацию напряжений в результате броуновского движения частиц. Это может быть причиной вызывающей реге-

нерацию хрящевой ткани в экспериментах *in vivo* по лазерно-стимулированной регенерации хрящевой ткани [37].

Выводы

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наночастицы (магнетит Fe_3O_4 и металлооксидная бронза $Na_{0.2}TiO_2$) имеют одинаковое влияние на скорость роста температуры при лазерном воздействии эрбиевым волоконным лазером с длиной волны λ=1,56 мкм, но деформационный отклик ткани при этом различен.

Подтверждено, что картина ОКТ-деформаций для интактной ткани и ткани после пропитки раствором наночастиц практически не отличается, так как интактная ткань практически не пропускает наночастиц.

ОКТ-эластография позволила определить изменения амплитуды смещений в хрящевой ткани при пропитке ее магнетитом в зависимости от ее начального состояния.

Список литературы

1. Enhanced optical clearing of skin in vivo and optical coherence tomography in-depth imaging / X. Wen, D. Zhu, S. L. Jacques, V. V. Tuchin. – DOI 10.1117/1.JBO.17.6.066022 // Journal of Biomedical Optics. – 2012. – Vol. 17, № 6. – P. 066022.

2. Correction factor in temperature measurements by optoelectronic systems / N. Bikberdina, R. Yunusov, M. Boronenko, P. Gulyaev // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 917. – P. 052031.

3. Ghosn, M. G. Nondestructive quantification of analyte diffusion in cornea and sclera using optical coherence tomography / M. G. Ghosn, K. V. Larin, V. V. Tuchin. – DOI 10.1167/iovs.06-1331 // Investigative Ophthalmology and Visual Science. – 2007. – Vol. 48, № 6. – P. 2726–2733.

4. Thermal expansion of rib cartilage implants at the non-isothermal cooling and heating / E. Kasianenko, A. Omelchenko, R. Nushtaeva, E. Sobol. – DOI 10.1007/s10973-019-08695-7 // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2020. – Vol. 139, № 6. – P. 3519–3526.

5. Оценка скорости и температуры дисперсной фазы / М. П. Бороненко, И. П. Гуляев, П. Ю. Гуляев [и др.]. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11-10. – С. 2135–2140.

6. Borodina, K. Thermal analysis of reaction producing K_XTiO_2 / K. Borodina, S. Sorokina, N. Blinova. – DOI: 10.1007/s10973-017-6840-0 // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2018. – Vol. 131, № 1. – P. 561–566.

7. Измерение скорости и температуры частиц / М. П. Бороненко, И. П. Гуляев, П. Ю. Гуляев, А. Е. Серегин. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57, № 3-2. – С. 70–73.

8. Долматов, А. В. Спектральный пирометр для контроля температуры / А. В. Долматов, И. П. Гуляев, Р. Р. Имамов. – Текст : непосредственный // Вестник Югорского государственного университета. – 2014. – № 2 (33). – С. 32–42.

9. Dolmatov, A. V. Investigation of structure formation in thin films by means of optical pyrometry / A. V. Dolmatov, I. V. Milyukova, P. Y. Gulyaev. – DOI 10.1088/1742-6596/1281/1/012010 // Journal of Physics: Conference Series, Saint Petersburg, 14-16.05.2019. – Saint Petersburg :Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012010.

10. Optical coherence tomography monitoring of enhanced skin optical clearing in rats in vivo / E. A. Genina, A. N. Bashkatov, E. A. Kolesnikova [et al.]. – DOI 10.1117/1.JBO.19.2.021109 // Journal of Biomedical Optics. – 2014. – Vol. 19, № 2. – P. 021109.

11. Photothermal effects of laser heating iron oxide and oxide bronze nanoparticles in cartilaginous tissues / P. Y. Gulyaev, M. K. Kotvanova, S. S. Pavlova [et al.]. – DOI 10.1134/S1995078012020097 // Nanotechnologies in Russia. – 2012. – Vol. 7, № 3-4. – P. 127–131.

12. Metal oxide nanoparticles as novel contrast agents for optical diagnostics and laser treatment of arthritis / E. N. Sobol, Y. M. Soshnikova, A. I. Omelchenko [et al.] // Optics InfoBase Conference Papers, Fort Lauderdale, FL, 25-28.04.2016. – Fort Lauderdale, 2016. – P. 3.

13. SHT-synthesis and application of biofunctionalnanoparticals used high photo-thermal effect for laser heating of biotissues / P. Yu. Gulyaev, M. K. Kotvanova, A. I. Omelchenko, E. N. Sobol // The 23th Annual International Conference on Advanced Laser Technologies. ALT'15 :BookofAbstracts, Faro, 07-11.09.2015. – Faro, 2015. – P. 46.

14. Molecular imaging with optical coherence tomography using ligand-conjugated microparticles that detect activated endothelial cells: rational design through target quantification / A. Jefferson, R. S. Wijesurenda, M. A. McAteer [et al.] // Atherosclerosis. – 2011. – Vol. 219. – P. 579–587.

15. Single-molecule imaging of hyaluronan in human synovial fluid / J. Kappler, T. P. Kaminski, V. Gieselmann [et al.]. – DOI 10.1117/1.3514639 // Journal of Biomedical Optics. – 2010. – Vol. 15 (6). – P. 060504.

16. Continuous optical coherence tomography monitoring of nanoparticles accumulation in biological tissues / M. A. Sirotkina, M. V. Shirmanova, M. L. Bugrova [et al.]. – DOI 10.1007/s11051-010-0028-x // Journal of Nanoparticle Research. – 2011. – Vol. 13, № 1. – P. 283–291.

17. Optical Coherence Tomography monitoring for laser surgery of laryngeal carcinoma / A. V. Shakhov, A. B. Terentjeva, V. A. Kamensky [et al.]. – DOI 10.1002/jso.1105 // Journal of Surgical Oncology. – 2001. – Vol. 77, № 4. – P. 253–258.

18. Клинико-экспериментальное обоснование применения оптической когерентной томографии в медицинской практике / Н. М. Шахова, В. М. Геликонов, Г. В. Геликонов [и др.]. – Текст : непосредственный // Лазерная медицина. – 2004. – Т. 8, № 3. – С. 292.

19. Kamensky, V. In sity monitoring of laser modification process in human cataractous lens and porcine cornea using coherence tomography / V. Kamensky, F. Feldchtein, A. Sergeev // Journal Biomedical Optics. – 1999. – Vol. 4, № 1. – P. 137–143.

20. Eye tissue structure and refraction alterations upon nondestructive laser action / E. N. Sobol, O. I. Baum, N. Yu. Ignat'eva [et al.]. – DOI 10.1134/S1054660X0605001X // Laser Physics. – 2006. – Vol. 16. – No 5. – P. 735-740.

21. Visibility of trabecular meshwork by standard and polarization-sensitive optical coherence tomography / Y.Yasuno, M.Yamanari, K.Kawana [et al.]. – DOI: 10.1117/1.3499421 // Journal of Biomedical Optics. – 2010. – Vol. 15 (6). – P. 061705.

22. Optical coherence elastography for strain dynamics measurements in laser correction of cornea shape / V. Y. Zaitsev, A. L. Matveyev, L. A. Matveev [et al.]. – DOI 10.1002/jbio.201600291 // Journal of Biophotonics. – 2017. – Vol. 10, № 11. – P. 1450–1463.

23. Magnetite nanoparticles with tunable gold or silver shell / M. Mandal, S. Kundu, S. K. Ghosh [et al.] // Journal of Colloid and Interface Science. – 2017. – Vol. 286. – P. – 187–194.

24. Iwamoto, T. Fabrication of iron oxide nanoparticles using laser ablation in liquids / T. Iwamoto, T. Ishigaki. – DOI: 10.1088/1742-6596/4411/012034 // 11th APCPST and 25th SPSM JOP:Conf.Series. – 2013. – Vol. 441. – P. 012034.

25. Biofunctional magnetic 'core-shell' nanoparticles generated by laser ablation of iron in liquid / A. I. Omelchenko, E. N. Sobol, A. V. Simakin [et al.]. – DOI 10.1088/1054-660X/25/2/025607 // Laser Physics. – 2015. – Vol. 25, № 2. – P. 025607.

26. Laser-induced micropore formation and modification of cartilage structure in osteoarthritis healing / E. Sobol, O. Baum, A. Sviridov A. [et al.]. – DOI: 10.1117/1.JBO.22.9.091515 // Journal of Biomedical Optics. – 2017. – Vol. 22, № 9. – P. 091515.

27. Laser reshaping of costal cartilage for transplantation / O. I. Baum, Y. M. Soshnikova, E. N. Sobol [et al.]. – DOI 10.1002/lsm.21077 // Lasers in Surgery and Medicine. – 2011. – Vol. 43, № 6. – P. 511–515.

28. The new method for treatment of larynx stenosis based on transplantation of rib cartilage reshaped with 1.56-μm laser radiation / O. I. Baum, Y. M. Alexandrovskaya, S. V. Starostina [et

al.]. – DOI 10.1117/12.2511410 // Progress in Biomedical Optics and Imaging – Proceedings of SPIE, San Francisco, CA, 02.02.2019. – San Francisco, 2019. – P. 108530G.

29. Kasianenko, E. M. Photothermal effect of laser radiation on the electrical properties of cartilage impregnated with magnetite nanoparticles / E. M. Kasianenko, A. I. Omelchenko, E. N. Sobol // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics volume. – 2016. – Vol. 80. – P. 463–466.

30. Касьяненко, Е. М. Фототермический эффект лазерного нагрева наночастиц в биологических тканях / Е. М. Касьяненко, А. И. Омельченко. – Текст :непосредственный // Ученые записки физического факультета Московского университета. – 2019. – № 2. – С. 1920302.

31. Стимуляция проникновения магнитных наночастиц в хрящевую и костную ткань с помощью градиента магнитного поля / В. Ю. Афонькин, К. Г. Добрецов, А. К. Кириченко [и др.]. – Текст :непосредственный // Сибирское медицинское обозрение. – 2008. – № 2 (50). – С. 37–39.

32. Омельченко, А. И. Влияние лазерного излучения и магнитного поля на массоперенос фотопоглощающих магнитных наночастиц в вязкоупругих биологических тканях / А. И. Омельченко, Э. Н. Соболь. – Текст : непосредственный // Перспективные материалы. – 2010. – № 8. – С. 125–128.

33. Starch-modified magnetite nanoparticles for impregnation into cartilage / Y. M. Soshnikova, O. I. Baum, E. N. Sobol [et al.]. – DOI 10.1007/s11051-013-2092-5 // Journal of Nanoparticle Research. – 2013. – Vol. 15, № 11. – P. 2092–2101.

34. Gulyaev, P. Y. Nanotechnologies of the Treatment and Production of Complex Transition Metal Oxides with High Photothermal Effect / P. Y. Gulyaev, M. K. Kotvanova, A. I. Omelchenko. – DOI 10.1134/S2075113318030140 // Inorganic Materials: Applied Research. – 2018. – Vol. 9, № 3. – P. 540–545.

35. Optical coherence tomography for visualizing transient strains and measuring large deformations in laser-induced tissue reshaping / V. Y. Zaitsev, A. L. Matveyev, L. A. Matveev [et al.]. – DOI 10.1088/1612-2011/13/11/115603 // Laser Physics Letters. – 2016. – Vol. 13, № 11. – P. 115603.

36. Optical coherence elastography for strain dynamics measurements in laser correction of cornea shape / V. Y. Zaitsev, A. L. Matveyev, L. A. Matveev [et al.]. – DOI 10.1002/jbio.2016002

37. Nanoparticles for diagnostics and laser medical treatment of cartilage in orthopaedics /O.I. Baum, Yu.M. Soshnikova, A.I. Omelchenko and Emil Sobol // Colloidal Nanocrystals for Biomedical Applications VIII, edited by Wolfgang J. Parak,Marek Osinski, Kenji Yamamoto, Proc. of SPIE Vol. 8595, 85951K - DOI: 10.1117/12.2008536

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 г. Выпуск 1 (64). С. 32–41

УДК 621.74:669.187
DOI: 10.18822/byusu20220132-41

ОПТИМИЗАЦИЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СИЛУМИНОВОГО СПЛАВА ЛИГАТУРОЙ AL-TI-B, ПОЛУЧЕННОЙ ИЗ ДИСПЕРСНЫХ ОТХОДОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫМ ЛИТЬЁМ

Сафронов Николай Николаевич
доктор технических наук,
профессор Набережночелнинского института
Казанского (Приволжского) Федерального университета,
Набережные Челны, Россия
E-mail: safronov-45@mail.ru

Харисов Ленар Рустамович
кандидат технических наук,
доцент Набережночелнинского института
Казанского (Приволжского) Федерального университета,
Набережные Челны, Россия
E-mail: ln271@mail.ru

Фазлыев Марат Рашитович
аспирант Набережночелнинского института
Казанского (Приволжского) Федерального университета
Набережные Челны, Россия
E-mail: 4763460@gmail.com

В настоящей работе исследован и оптимизирован процесс модифицирования сплава АК7 опытной лигатурой на основе системы Al-Ti-B, изготовленной из стружечных отходов машиностроения с использованием комбинации процессов порошковой металлургии и электрошлакового литья. Получена адекватная линейная модель на основе проведенного исследования по плану полного факторного эксперимента, в котором управляемыми факторами являлись: массовое соотношение в шихтовой композиции титан- и борсодержащих материалов Роль растворителя в шихтовой композиции исполнял стружечный отход литейного сплава марки АК7. Откликом кибернетической системы являлся размер литого зерна модифицируемого сплава АК7. Установлен зерноизмельчающий эффект управляемых факторов. Установлен минимальной возможный размер литого зерна модифицированного сплава АК7 гарантирован с 95% вероятностью на уровне 250 мкм.

Ключевые слова: сплавы алюминия, модифицирование, лигатура Al-Ti-B, зародышеобразование, электрошлаковое литье, дисперсные отходы машиностроения

THE OPTIMIZATION OF SILUMIN ALLOY MODIFICATION WITH AL-TI-B MASTER ALLOY PRODUCED FROM DISPERSED WASTE OF ENGINEERING WITH ELECTROSLAG CASTING

Safronov Nikolai Nikolaevich
Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Naberezhnye Chelny Institute
of Kazan (Volga Region) Federal University,
Naberezhnye Chelny, Russia
E-mail: safronov-45@mail.ru

Kharisov Lenar Rustamovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Naberezhnye Chelny Institute
of Kazan (Volga Region) Federal University,
Naberezhnye Chelny, Russia
E-mail: ln271@mail.ru

Fazlyev Marat Rashitovich
Postgraduate Student of the Naberezhnye Chelny Institute
of Kazan (Volga Region) Federal University
Naberezhnye Chelny, Russia
E-mail: 4763460@gmail.com

In this research the process of modifying the AK7 alloy with an experimental master alloy based on the Al-Ti-B system, made from machine-building chip waste, using a combination of powder metallurgy and electroslag casting processes, was studied and optimized. The adequate linear model was obtained on the basis of the study, carried out according to the plan of a full factorial experiment, in which the controlled factors were: the mass ratio of titanium- and boron-containing materials in the charge composition. The role of the solvent in the charge composition was played by the chip waste of the AK7 cast alloy.The response of the cybernetic system was the size of the cast grain of the modified AK7 alloy. The grain-grinding effect of controlled factors has been established. The minimum possible size of the cast grain of the modified AK7 alloy is established with a 95% probability at the level of 250 microns.

Keywords: aluminum alloys, modification, Al-Ti-B addition alloy, nucleation, electroslag casting, dispersed mechanical engineering waste

Введение

Модифицирование алюминиевых сплавов является эффективным технологическим процессом измельчения макрозерна, что существенным образом обуславливает повышение механических свойств сплава [1]. Для достижения указанной цели в расплав вводят различные элементы, в том числе достаточно широко используемые на практике, относящиеся к группе сильных модификаторов титан и бор. Эффект модифицирования достигается при сравнительно небольших количествах вводимых в расплав лигатур, содержащих титан и бор, – не более 1 кг на 1 т модифицируемого металла. Однако при этом литое зерно существенно измельчается. Титан и бор как модификаторы относятся к группе, которая в расплаве образует высокодисперсную взвесь. Её частицы служат зародышами, вокруг которых образуются и растут кристаллы. Вследствие этого увеличивается число центров кристаллизации, являющихся химически инертными к расплаву, изоморфными с кристаллами расплава и имеющими твёрдое агрегатное состояние [2, 3].

Учитывая высокую зерноизмельчающую способность силуминовых сплавов титан- и борсодержащей лигатуры, нами предложена ресурсосберегающая технология её получения с привлечением дисперсных отходов машиностроения, основанная на комбинации электрошлакового литья с процессами компактирования в порошковой металлургии. Данная технология является эффективной альтернативой традиционной плавильно-литейной технологии, различные варианты которой изложены в [4]. Преимущество предложенной технологии заключается в том, что синтез материала лигатуры, доведение его до жидкого агрегатного состояния, заполнение им литейной формы и затвердевание синтезированного материала происходит непрерывно и одновременно, что исключает массу технологических переделов, присущих традиционной плавильно-литейной технологии, в которой указанные операции

разобщены в пространстве и во времени, что обуславливает наличие сложного дорогостоящего технологического оборудования. Кроме того, электрошлаковый металл отличается высоким качеством, обусловленным изоляцией металлического расплава слоем жидкого шлака и его рафинирующим воздействием на формирующийся металл в виде капель с высоко развитой поверхностью. Дополнение к электрошлаковому процессу технологий порошковой металлургии по компактированию дисперсных компонентов, в том числе стружечных отходов машиностроения, вводит эту комбинацию в разряд эффективных рециркуляторов промышленных отходов. Не в меньшей степени по эффективности предложенная комбинация является управляющим рычагом качества модифицирования алюминиевых расплавов и его оптимизации через композицию исходных шихтовых материалов.

Методическая парадигма проблемы оптимизации силуминовых опытной лигатурой Al-Ti-B

В настоящей работе исходными материалами для изготовления опытной лигатуры Al-Ti-B служили стружечные отходы литейного сплава марки АК7, технического титана марки ВТ1-00 и аморфный бор марки А. Указанные материалы измельчались до фракции <50 мкм, смешивались и компактировались мундштучным прессованием с получением пруткового изделия диаметром 10 мм и длиной 500 мм. Это изделие служило расходной субстанцией электрошлакового процесса литья прутковой лигатуры диаметром 10 мм. Объектом модифицирования был сплав марки АК7. Эта же марка алюминиевого сплава в виде стружечных отходов, как было выше указано, использовалась в качестве основного компонента шихтовой композиции для формирования расходной субстанции электрошлакового процесса литья прутковой лигатуры и исполняла роль её матрицы. Приготовление расплава, поддержание его температуры и проведение модифицирования указанной марки алюминиевого сплава производили в электропечи сопротивления САТ-0,16 в стальных тиглях. В качестве исходных шихтовых материалов использовали алюминий марки А7 (ГОСТ 11069-2001), сплав АК12пч (ГОСТ 1583-93) и магний МГ95 (ГОСТ 1583-93). Введение модификатора в приготовленный расплав осуществлялось при температуре 720±20 °С. Исследование структуры модифицированного металла проводилось на образцах, вырезанных из слитков круглого поперечного сечения диаметром 150 мм, полученных заливкой расплава в подогретый до 300 °С стальной кокиль. Анализ микроструктуры проводили с использованием микроскопа «NEOPHOT-21», а количественную её оценку с помощью программы для анализа цифровых изображений Axio Vizion (Carl Zeiss) с использованием измерительных модулей Interactive Measurement (Program Wizard).

Объектом исследования как кибернетическая система «черный ящик» [5] в настоящей работе является зерноизмельчающий эффект опытной лигатуры Al-Ti-B, выраженный размером литого зерна модифицируемого сплава АК7. Этот параметр играет роль отклика – количественной величины, характеризующей объект исследования. Задача определения функциональной зависимости отклика от влияющих на него факторов решалась посредством активного эксперимента, отличающегося от пассивного большей скоростью и эффективностью нахождения решения. В качестве варьируемых управляемых факторов выбраны те, которые характеризуют особенности комбинации шихтовых материалов получения опытной лигатуры Al-Ti-B предлагаемым нами способом, и количество вводимой в расплав АК7 этой лигатуры: x_1 – массовое соотношение в шихтовой композиции титан- и борсодержащих материалов при допустимых пределах варьирования 2-10; x_2 – массовая доля (%) в шихтовой композиции борсодержащего материала при допустимых пределах варьирования 0,2-1; x_3 – количество вводимой в расплав лигатуры (кг/т расплава) при допустимых пределах варьирования 0-0,6. Характерно, что первый управляемый фактор одновременно указывает на количество в шихтовой композиции титансодержащего материала при известном количестве борсодержащего.

Английский статистик Рональд Фишер в своей работе [6] доказал целесообразность одновременного варьирования всеми факторами, существенно влияющими на оптимизируемый параметр. Поэтому за основу установления функциональной зависимости между откликом и указанными выше управляемыми факторами (математическая модель) нами было выбрано планирование опытных исследований по плану полного факторного эксперимента [7]. Конкретный план проведенных исследований представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание плана проведенных исследований по установлению функциональной зависимости между откликом кибернетической системы и управляемыми факторами

№ опыта	План								Отклик
	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1*X_2	X_1*X_3	X_2*X_3	$X_1*X_2*X_3$	$У_i$
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	$У_1$
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	$У_2$
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	$У_3$
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	$У_4$
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	$У_5$
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	$У_6$
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	$У_7$
8	1	1	1	1	1	1	1	1	$У_8$

План, представленный в таблице 1, является насыщенным ввиду того, что число опытов равно числу определяемых коэффициентов математической модели, отражающей влияние трёх управляемых факторов на размер литого зерна модифицируемого сплава АК7:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^{3} b_i x_i + \sum_{i,u=1}^{3} b_{iu} x_i x_u + b_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (1)$$

Реализация указанного плана позволяет определить оценки всех коэффициентов математической модели (1). Обсуждаемый план (таблица 1) говорит о том, что управляемые факторы варьируются только на двух уровнях – верхнем и нижнем и соответственно обозначены 1 и -1. Следует отметить, что управляемые факторы, представленные в таблице 1, имеют кодированные значения. Методика кодирования приведена в работе [8]. Столбцы x_1, x_2, x_3 задают планирование эксперимента – по ним определяют результаты опыта; столбцы x_0, x_1*x_2, x_1*x_3, x_2*x_3, $x_1*x_2*x_3$ служат только для расчета. Члены уравнения регрессии (1), содержащие произведения x_1*x_2, x_1*x_3, x_2*x_3, отражают парное взаимодействие факторов, член уравнения регрессии $x_1*x_2*x_3$ отражает тройное взаимодействие. В таблице 1 добавлен столбец фиктивной переменной x_0, нужный для оценки свободного члена b_0.

В колонке «отклик кибернетической системы» помещается результат наблюдения величины средневзвешенного размера литого зерна модифицируемого сплава АК7 из анализируемой совокупности. Этот параметр носит случайный характер. Поэтому для уменьшения погрешности оценки истинного значения отклика необходимо в каждой точке плана проводить несколько параллельных опытов. По их результатам определяют среднее значение отклика. Такая методика даёт возможность уменьшить погрешность оценки истинного значения отклика в $\sqrt{m}$ раз (m – количество параллельных опытов). В настоящей работе принято m=3. Кроме того, для каждого опыта проделана процедура по выявлению возможных грубых промахов или выскакивающих значений в серии параллельных откликов при одинаковых значениях управляемых факторов. Указанная процедура проводилась нами с использованием широко применяемого для малой выборки метода максимального относительного отклонения [9]. Максимальное относительное отклонение $\tau_{макс.}$ – это относительное отличие проверяемого (крайнего) результата $y_{кр}$ от среднего арифметического $y_{ср.}$, выраженное в долях среднеквадратичной ошибки Sm и вычисляемое по следующей формуле:

$$\tau_{макс.} = \left| \frac{1}{\sqrt{(m-1)/m}} \frac{\text{уср.} - \text{укр.}}{\text{Sm}} \right| \leq \tau_{табл.} \quad (2)$$

Формула (2) указывает на то, что вычисленное значение максимального относительного отклонения необходимо сравнить с табличным на предмет, является ли проверяемый отклик входящим в данную числовую совокупность. Положительный ответ будет в случае соблюдения неравенства. Значение эталонного (табличного) показателя в условиях настоящего исследования $\tau_{табл.}$=1,41 [10]. Оно применимо для объёма выборки m=3 и риска ошибиться, равного 5 %.

С целью оценки качества проведенного в данной работе исследования проверялась однородность дисперсий, имевших место в 8 сериях опытов. Поскольку каждая серия насчитывала одинаковое количество параллельных опытов (m=3), указанная проверка однородности производилась по критерию Кохрена [11]. Данный критерий означает долю максимальной дисперсии в сумме всех имеющихся, то есть вычисляется по формуле:

$$G = (S_y^2)_{max} / \sum S_y^2 \leq G_{крит.} \quad (3)$$

Формула (3) одновременно даёт основание судить о равноточности 8 серий опытов. Критическое значение критерия Кохрена ($G_{крит.}$) определяется в зависимости от числа степеней свободы каждой дисперсии (в настоящем исследовании оно равно m-1=2), числа серий опытов (8) и уровня значимости (α=0,05). Расчётное значение критерия Кохрена (G) сравнивалось с критическим $G_{крит.}$=0,5157.

Определение коэффициентов уравнения регрессии (1) основано на методе наименьших квадратов, и являются они результатом скалярного произведения столбца y_i на соответствующий столбец плана (таблица 1) с соотнесением к числу опытов в матрице планирования N=8. В соответствии с этим вычисления коэффициентов уравнения регрессии (1) осуществляются по следующим формулам:

$$b_{j(0,1,2,3)}=\frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8} x_{ji}y_i,\ b_{12}=\frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8}(x_1x_2)_i y_i,\ b_{13}=\frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8}(x_1x_3)_i y_i,\ b_{23}=\frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8}(x_2x_3)_i y_i,$$
$$b_{123}=\frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8}(x_1x_2x_3)_i y_i. \quad (4)$$

Оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии производилась путём их сопоставления с границей (ε) доверительного интервала. Критерием значимости является превышение абсолютной величины коэффициента этой границы. Чем больше это превышение, тем более значим коэффициент уравнения регрессии. Это обстоятельство приобретает важное значение при анализе коэффициентов уравнения регрессии на предмет их вклада в величину отклика кибернетической системы. Характерной особенностью её является то, что коэффициенты регрессии не коррелированы между собой, так как матрица полного факторного эксперимента является диагональной. Вследствие этого диагональные элементы ковариационной матрицы равны между собой, и поэтому все коэффициенты уравнения регрессии определяются с одинаковой точностью, характеризуемой стандартным отклонением S_{bi}. Кроме того, если какие-либо коэффициенты уравнения регрессии окажутся незначимыми, то их исключение из уравнения (1) не скажется на остальных коэффициентах.

Граница доверительного интервала определялась по следующей формуле:

$$\varepsilon = t^* S_{bi}, \quad (5)$$

в которой t* – табличное значение критерия Стьюдента, выбранного для уровня доверия 95 % и числа степеней свободы N(m-1)=16, t*=2,12. Стандартное отклонение для коэффициентов уравнения регрессии (1) S_{bi} определялось извлечением корня квадратного из дисперсии для них, которая вычислялась по следующей формуле:

$$S_{bi}^2 = \frac{S^2_{воспр.}}{Nm}, \quad (6)$$

где $S^2_{воспр.}$ – дисперсия воспроизводимости. Данная величина определялась на основании проведенных экспериментов 8 серий опытов, каждая из которых повторялась трижды. Дисперсия воспроизводимости в этом случае – это среднеарифметическое значение из 8 однородных построчных дисперсий.

После вышеуказанных действий формируется в окончательном виде математическая модель отклика кибернетической системы. Однако, чтобы ею пользоваться, необходимо исследовать обсуждаемую математическую модель на адекватность полученным экспериментальным данным. С этой целью определялась дисперсия адекватности [12] при условии равенства повторений опытов в каждой серии:

$$S^2_{\text{ад.}}=\frac{m}{N-d}\sum_{i=1}^{N}(\hat{y}_i - y_i)^2, \quad (7)$$

которая характеризует расхождение между значениями, полученными по уравнению регрессии ($\hat{y}_i$), и результатами эксперимента(y_i). В формуле (7) d – число коэффициентов проверяемого уравнения регрессии. Далее полученное значение дисперсии адекватности сравнивается с дисперсией воспроизводимости. Если первая дисперсия меньше второй, то однозначно делается вывод об адекватности полученной математической модели. В противном случае их отношение больше 1. В этом случае для разрешения проблемы адекватности прибегают к критерию Фишера [13], который регламентирует указанное отношение на предмет адекватности полученной математической модели.

Результаты экспериментального исследования и их анализ

Результаты по исследованию размера литого зерна сплава АК7, модифицированного опытной лигатурой на основе системы Al-Ti-B согласно плану таблицы 1, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Размер литого зерна сплава АК7 (мкм модифицированного опытной лигатурой Al-Ti-B

№ серии	№ параллельного опыта			Среднее значение размера зерна, мкм
	1	2	3	
1	802	828	842	824
2	942	1020	1085	1016
3	515	547	646	569
4	763	769	799	777
5	485	481	505	490
6	701	663	721	695
7	214	229	300	248
8	434	462	448	448

В таблице 2 помимо экспериментальных данных имеются и расчётные – среднее значение размера зерна (правый столбец) – отклик кибернетической системы. Учитывая важность этого параметра, необходимо убедиться в отсутствии грубых промахов или выскакивающих значений в каждой серии параллельных откликов. С этой целью были вычислены максимальные относительные отклонения $\tau_{\text{макс.}}$ в 8 сериях плана исследования. Кроме того, необходимо оценить качество проведенных опытов, на основе которых будет построена математическая модель. О надлежащем качестве можно судить, если все 8 серий опытов проведены с равной точностью, о чём свидетельствует критерий Кохрена. В таблице 3 приведены результаты расчётов построчных значений стандартных отклонений, дисперсий, максимальных относительных отклонений (2).

Таблица 3 – Статистические характеристики параллельных опытов серий экспериментов

№ серии	Стандартное отклонение	Дисперсия	Максимальные относительные отклонения $\tau_{\text{макс.}}$
1	20,3	412	1,33
2	72,0	5187	1,26
3	68,0	4630	1,37
4	19,3	373	1,40
5	12,9	165	1,40

6	29,2	854	1,34
7	45,8	2100	1,40
8	13,9	194	1,22

Данные таблицы 3 дают основания считать, что в планируемом эксперименте получены результаты, которые являются приемлемыми для построения математической модели. Все 8 серий параллельных опытов проведены так, что выскакивающих значений не обнаружено. Рассчитанные величины максимальных относительных отклонений не превышают эталонного (табличного) показателя, равного $\tau_{табл.}$=1,41. Построчные дисперсии однородны в силу того, что расчётное значение критерия Кохрена не превышает критического значения $G=\frac{5187}{412+5187+4630+373+165+854+2100+194} = 0{,}3728 < G_{крит.} = 0{,}5157.$

После установления репрезентативности данных таблицы 2 рассчитаем значения коэффициентов уравнения регрессии (1) по формулам (4):

$$b_0=\frac{1}{8}(824+1016+569+777+490+695+248+448)=633{,}4$$

$$b_1=\frac{1}{8}(-824+1016-569+777-490+695-248+448)=100{,}6$$

$$b_2=\frac{1}{8}(-824-1016+569+777-490-695+248+448)=-122{,}9$$

$$b_3=\frac{1}{8}(-824-1016-569-777+490+695+248+448)=-163{,}1$$

$$b_{12}=\frac{1}{8}(824-1016-569+777+490-695-248+448)=1{,}4$$

$$b_{13}=\frac{1}{8}(824-1016+569-777-490+695-248+448)=0{,}6$$

$$b_{23}=\frac{1}{8}(824+1016-569-777-490-695+248+448)=0{,}6$$

$$b_{123}=\frac{1}{8}(-824+1016+569-777+490-695-248+448)=-2{,}6.$$

Произведенные расчёты показывают, что коэффициенты уравнения регрессии значительно отличаются не только по знаку, но и по абсолютной величине в ряде случаев на 3 порядка. Это обстоятельство обуславливает провести анализ коэффициентов на их значимость, чтобы сформировать уравнение отклика кибернетической системы для последующей её оптимизации. Сначала рассчитаем дисперсию воспроизводимости, которая необходима не только для анализа коэффициентов уравнения регрессии на значимость, но и для анализа на адекватность полученного уравнения отклика кибернетической системы:

$$S^2_{воспр.} = \frac{1}{8}(412 + 5187+4630 + 373 + 165 + 854 + 2100 + 194) =1739.$$

Далее определяем дисперсию коэффициентов уравнения регрессии по формуле (6):

$$S^2_{bi} = \frac{1739}{8*3} =72,$$

стандартное отклонение для них (ошибка):

$$S_{bi}=\sqrt{72}=8{,}5$$

и границу доверительного интервала по формуле (5):

$$\varepsilon=2{,}12*8{,}5=18{,}0.$$

Сравнение коэффициентов уравнения регрессии (1) с границей доверительного интервала показывает, что значимыми являются b_0, b_1, b_2, b_3. Остальные коэффициенты незначимы для доверительной вероятности 95 %, и их можно не учитывать.

Проведенный выше анализ привёл к тому, что в окончательном виде математическая модель отклика кибернетической системы является линейной функцией исследуемых трёх переменных параметров. Перед тем, как делать определённые выводы по влиянию входных факторов на размер зерна модифицируемого лигатурой Al-Ti-B сплава АК7, необходимо

убедиться в адекватности полученной линейной модели экспериментальным данным. Для этого определим дисперсию адекватности по формуле (7):

$$S^2_{\text{ад.}} = \frac{3}{8-4}[(819\text{-}824)^2+(1020\text{-}1016)^2+(573\text{-}569)^2+(774\text{-}777)^2+(493\text{-}490)^2+(694\text{-}695)^2+(247\text{-}248)^2+(448\text{-}448)^2=57$$

и сравним её с дисперсией воспроизводимости. Первая дисперсия оказалась значительно меньше второй, что позволяет утверждать об адекватности полученной линейной модели. Данная модель является результатом обработки экспериментальных опытов, проведенных на верхних и нижних уровнях управляемых факторов. Для полной убеждённости в возможности использования полученной линейной модели были проведены дополнительные 4 эксперимента, в которых управляемые факторы имели значения, соответствующие нулевому (основному) уровню. Среднее значение отклика кибернетической системы составило:

$$y_0 = \frac{579+663+603+581}{4} = 606{,}5.$$

Линейная модель при нулевых уровнях управляемых факторов прогнозирует $\hat{y}=b_0=633{,}4$. Имеющаяся разность 633,4-606,5=26,9 между прогнозом и экспериментом на нулевом уровне относительно невелика и составляет 4,2 %, что позволяет утвердиться в справедливости гипотезы о возможности использования полученной линейной модели. Об этом же говорит также тот факт, что дисперсия опытов на нулевом уровне управляемых факторов ($S_0^2 = 1537$) больше дисперсии адекватности.

Полученная адекватная линейная модель, описывающая влияние управляемых факторов: x_1 – массовое соотношение в шихтовой композиции титан- и борсодержащих материалов, x_2 – массовая доля (%) в шихтовой композиции борсодержащего материала, x_3 – количество вводимой в расплав лигатуры (кг/т расплава) на величину средневзвешенного размера литого зерна, модифицируемого опытной лигатурой Al-Ti-B сплава АК7, позволяет с достаточной степенью достоверности (95 %) утверждать, что факторы x_2 и x_3 являются зерноизмельчающими, а фактор x_1 наоборот – зерноукрупняющим. Зерноизмельчающий эффект от воздействия факторов x_2 и x_3 очевидно связан с увеличением в модифицируемом сплаве АК7 количества зародышеобразующих частиц. Зерноукрупняющий эффект от воздействия фактора x_1 объясняется тем, что в зародышеобразующей субстанции опытной лигатуры объёмная доля мелких интерметаллидных частиц TiB_2 снижается с одновременным возрастанием объемной доли крупных интерметаллидных частиц Al_3Ti. Это обстоятельство обуславливает уменьшение количества зародышеобразующих частиц в модифицируемом расплаве.

В адекватной линейной модели коэффициенты при факторах x_1, x_2, x_3 имеют одинаковый порядок абсолютной величины, что говорит о примерно равном влиянии рассматриваемых факторов на размер зерна модифицируемого сплава. Однако некоторая разница в коэффициентах присутствует. В этой связи можно отметить следующее ранжирование управляемых факторов по влиянию на отклик кибернетической системы по убывающей последовательности x_3, x_2, x_1.

Обсуждаемая адекватная линейная модель может исполнять роль целевой функции, исследуя которую можно решить оптимизационную задачу по определению значений управляемых факторов, обуславливающих минимально возможный размер зерна модифицируемого сплава. Поскольку модель линейная, в настоящей работе использовалась методика линейного программирования для решения указанной задачи [14]. Произведенное исследование показало, что область поверхности отклика кибернетической системы, соответствующей минимальным размерам зерна модифицируемого сплава АК7, находится при кодированных значениях управляемых факторов вблизи вершины куба с координатами x_1, x_2, x_3 соответственно -1, +1, +1. Указанные значения управляемых факторов гарантируют модифицирующий эффект для сплава АК7 под воздействием опытной лигатуры Al-Ti-B с получением мелкого литого зерна размером на уровне 250 мкм.

Заключение

В настоящей работе исследован и оптимизирован процесс модифицирования сплава АК7 опытной лигатурой на основе системы Al-Ti-B, изготовленной из стружечных отходов машиностроения с использованием комбинации процессов порошковой металлургии и электрошлакового литья. Получена адекватная линейная модель на основе проведенного исследования по плану полного факторного эксперимента 2^3, в котором управляемыми факторами являлись: массовое соотношение в шихтовой композиции титан- и борсодержащих материалов (стружечные отходы технического титана марки ВТ1-00 и аморфный бор марки А) при допустимых пределах варьирования 2–10; массовая доля (%) в шихтовой композиции борсодержащего материала при допустимых пределах варьирования 0,2–1; количество вводимой в расплав лигатуры (кг/т расплава) при допустимых пределах варьирования 0–0,6. Роль растворителя в шихтовой композиции исполнял стружечный отход литейного сплава марки АК7. Откликом кибернетической системы являлся размер литого зерна модифицируемого сплава АК7. Установлен зерноизмельчающий эффект у второго и третьего управляемого фактора и зерноукрупняющий у первого. Сила влияния на эффект модифицирования у трёх управляемых факторов имеет один порядок. Однако некоторое различие имеет место и выражено по возрастанию влияния иерархической последовательностью, отмеченной выше. Минимально возможный размер литого зерна модифицированного сплава АК7 гарантирован с 95 % вероятностью на уровне 250 мкм при комбинации кодированных управляемых факторов -1, +1, +1.

Литература

1. Бакулин Д. В. Влияние модифицирующей лигатуры Al-Ti-B на алюминиевые сплавы // Евразийский Научный Журнал. – 2020. – № 5. – Рубрика: Технические науки.

2. Александров В. М. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Учебное пособие. Часть 1. Материаловедение. Стандарт третьего поколения / В. М. Александров. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2015. – 327 с.

3. Гончаренко Е. С., Трапезников А. В., Огородов Д. В. Литейные алюминиевые сплавы (к 100-летию со дня рождения М. Б. Альтмана) // Электронный научный журнал «Труды ВИАМ». – 2014. – № 4.

4. Попов Д. А., Огородов Д. В., Трапезников А. В. Альтернативные источники борсодержащего сырья для производства лигатуры Al-B (обзор) // Труды ВИАМ. – 2015. – № 10. – С. 41-47.

5. Поваров Г. Н. Норберт Винер и его "Кибернетика" (от редактора перевода) // Винер Н. Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине. – 2-е издание. – М.: Наука; Главная редакция изданий для зарубежных стран, 1983. – С. 5-28.

6. Box G. Problems in the analysis of growth / G. Box – N-Y. – 1936, p. 376.

7. Чубинский А. Н. Методы и средства научных исследований. Методы планирования и обработки результатов экспериментов: учебное пособие для студентов, обучающихся по направлениям 35.03.02 и 35.04.02 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств», профиль «Технология деревообработки» / А.Н. Чубинский, Д.С. Русаков, И.М. Батырева, Г.С. Варанкина – СПб.: СПбГЛТУ, 2018. – 109 с.

8. Макаричев Ю. А., Иванников Ю. Н. Методы планирование эксперимента и обработки данных: учеб. пособие / Макаричев Ю. А., Иванников Ю. Н. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с.: ил.

9. Третьяк Л. Н. Основы теории и практики обработки экспериментальных данных: учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры / Л. Н. Третьяк, А.Л. Воробьев; под общ. ред. Л. Н. Третьяк. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2017. – 217 с. (Серия: Университеты России).

10. Бараз В. Р. Использование MS Excel для анализа статистических данных: учеб. Пособие / В. Р. Бараз, В. Ф. Пегашкин; М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. Первого Президента России Б. Н. Ельцина», Нижнетагил. техн. ин-т (филиал). − 2-е изд., перераб. и доп. − Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2014. – 181с.

11. Бондарчук С. С., Бондарчук И. С. Статобработка экспериментальных данных в MS Excel: учебное пособие. – Томск: Издательство Томского государственного педагогического университета, 2018. – 433 с.

12. Ерещенко Т. В. Планирование эксперимента [Электронный ресурс]: учебно-практическое пособие / Т. В. Ерещенко, Н. А. Михайлова; М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т. – Электронные текстовые и графические данные (1,1 Мбайт). – Волгоград: Волг. ГАСУ, 2014. – Учебное электронное издание сетевого распространения. – Систем. требования: PC 486 DX-33; Microsoft Windows XP; Internet Explorer 6.0; Adobe Reader 6.0. – Официальный сайт Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Режим доступа: http://www.vgasu.ru/publishing/online/ – Загл. с титул. экрана. ISBN 978-5-98276-728-8.

13. Ермолаев-Томин, О. Ю. Математические методы в психологии: учебник для академического бакалавриата / О.Ю. Ермолаев-Томин. – 5-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2017. – 511 с. – (Бакалавр. Академический курс). – ISBN 978-5-534-03201-7. – Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. – URL: https://urait.ru/bcode

14. Анисимова Н. П., Ванина Е. А. Линейное программирование [Текст]: учеб.-метод. пособие / Н.П. Анисимова, Е.А. Ванина; Санкт-Петербургский филиал Нац. исслед. ун-та «Высшая школа экономики». – СПб.: НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург, 2012. – 70 с. – 150 экз. ISBN 978-5-00055-003-8 (в обл.).

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 г. Выпуск 1 (64). С. 42–56

УДК 539.234:666-416
DOI: 10.18822/byusu20220142-56

СТРУКТУРНО-ФАЗОВАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ АЛЮМИНИЕВЫХ ПЛЕНОК В МНОГОСЛОЙНЫХ СИСТЕМАХ

Снитовский Юрий Павлович
кандидат технических наук,
доцент кафедры микро- и наноэлектроники
Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники
Минск, Белоруссия
E-mail: yu.snitovsky@tut.by

Работа посвящена изучению влияния последовательности слоев металла в двухслойных пленках (Al – 0,5 % Ni)/Mo и состава SiO2/Si (111) на фазовый состав и структурное совершенство Al – 0,5 %. Образцы, использованные в эксперименте, представляли собой двухслойные металлические пленки (Al – 0,5 % Ni)/Mo и Mo/(Al – 0,5 % Ni), которые были нанесены на подложки из монокремния ориентации (111) и состава SiO2/Si (111). Исследовано влияние расположения металлических слоев на фазовый состав, кристаллографическую ориентацию зерен алюминия и их распределение по толщине пленок Al – 0,5 % Ni. Показано, что отжиг системы Al/Mo/Al в атмосфере кислорода существенно влияет на плотность оксидов на поверхности алюминиевой пленки, чему способствуют высокое сродство алюминия к кислороду и полиморфизм его соединений с кислородом в широком диапазоне температур.

Ключевые слова: многослойные покрытия, сплавы алюминия, тонкие пленки, поликристаллические структуры, рентгенофазовый анализ, отжиг поверхности.

STRUCTURAL-PHASE INHOMOGENEITY OF ALUMINUM FILMS IN MULTILAYER SYSTEMS

Yuri P. Snitovsky

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics,
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Belarus
E-mail: yu.snitovsky@tut.by

The work is devoted to the study of the influence of the sequence of metal layers in two-layer films (Al – 0.5% Ni)/Mo and composition SiO2/Si (111) on the phase composition and structural perfection of Al – 0.5% Ni films. The samples used in the experiment were two-layer metal films (Al – 0.5% Ni)/Mo and Mo/(Al – 0.5% Ni), which were deposited on monosilicon substrates of orientation (111) and composition SiO2/Si (111). The influence of the arrangement of metal layers on the phase composition, crystallographic orientation of aluminum grains and their distribution over the thickness of Al – 0.5% Ni films has been studied. It is shown that the annealing of the Al/Mo/Al system in an oxygen atmosphere significantly affects the density of oxides on the surface of the aluminum film, which is facilitated by the high affinity of aluminum for oxygen and the polymorphism of its compounds with oxygen in a wide temperature range.

Keywords: multilayer coatings, aluminum alloys, thin films, polycrystalline structures, X-ray phase analysis, surface annealing.

Введение

Тонкие поликристаллические пленки (ТПП) металлических [1], полупроводниковых [2], диэлектрических материалов и их многослойные [3, 6], в частности эпитаксиальные, композиции (ЭК) широко применяются в самых различных областях [26-28, 30-36]. Без них немыслима, например, электронная техника и особенно микроэлектроника [22, 23]. Одним из основных и трудно выполняемых требований, предъявляемых к ТПП и ЭК, является необходимость стабильного (от партии к партии) воспроизведения их состава, структуры, а применительно к поликристаллам – величины зерна и текстуры и, в конечном итоге, уровня служебных (электрофизических, механических и других) характеристик [24-27].

Эти трудности связаны с резкой зависимостью фазового состава и особенно структуры пленок от небольших колебаний в условиях их получения. ТПП, в частности металлических материалов, характеризуются высокой дисперсностью микроструктуры, высокой концентрацией различного рода структурных несовершенств (дислокаций, двойников, дефектов упаковки, частиц метастабильных фаз, точечных дефектов и их скоплений), различных для разных текстурных компонент, разнозернистостью, см., например, работы [1, 4, 22, 24].

Цель работы – совершенствование механизма формирования тонких поликристаллических пленок, их структуры и путей управления этим механизмом, а также исследования связи между структурой и свойствами пленок. Вследствие различий состава и коэффициентов термического расширения у различных слоев многослойных композиций в пленках возникают значительные упругие макронапряжения, которые могут приводить к изгибу, отслаиванию пленок, а релаксация этих макронапряжений – к образованию дислокаций и двойников, развитию нежелательных процессов на границах раздела между слоями и в самих пленках [30, 33]. Это ведет к браку или снижению служебных характеристик прибора микроэлектроники или пленочной композиции.

Методика исследования

В первой серии экспериментов использовались образцы для исследований, представляющие собой двухслойные металлические пленки (Al – 0,5 % Ni)/Mo и Mo/(Al – 0,5 % Ni), осажденные на подложки из монокремния ориентации (111) и композиции SiO_2/Si (111). Исследовалось влияние расположения металлических слоев на фазовый состав, кристаллографическую ориентацию зерен алюминия и их распределение по толщине Al – 0,5 % Ni пленок.

В частности, были изготовлены четыре системы: (Al – 0,5 % Ni)/Mo/Si, Mo/(Al – 0,5 % Ni)/Si, (Al – 0,5 % Ni)/Mo/SiO_2/Si, а также и Mo/(Al – 0,5 % Ni)/SiO_2/Si. Системы Mo/(Al – 0,5 % Ni)/Si и Mo/(Al – 0,5 % Ni)/SiO_2/Si были необходимы для корректного описания роли барьерного слоя Mo.

Влияние расположения металлических слоев в двухслойных пленках (Al – 0,5 % Ni)/Mo и SiO_2/Si (111) на фазовый состав и структуру пленок

В качестве подложки использовались пластины монокремния КЭФ 10/0,1 ориентации (111), вырезанные из слитка диаметром 40 мм, которые исходно были легированы фосфором до получения удельного сопротивления 10 Ом·см. При этом поверхность пластин подвергалась химико-механической полировке. А толщина слоя SiO_2, сформированная термическим окислением подложек монокремния, составила ~0,3 мкм.

Для нанесения пленок молибдена на поверхность подложек Si (111), на поверхность композиции SiO_2/Si (111), на слой алюминия с добавками никеля использовали метод магнетронного распыления молибденовой мишени на установке «Магна-2М» в среде аргона. Вакуум в системе был не хуже 0,25-0,65 Па. Ток 2-3 А, напряжение 400-500 В. Время распыления составило 15-19 мин., толщина пленки молибдена ~70 нм, а поверхностное сопротивление ~4 Ом/мкм.

Слой алюминия толщиной ~1 мкм с добавками никеля на поверхность подложек, на поверхность композиции SiO_2/Si (111), а также на поверхность пленок молибдена наносили термическим испарением навесок алюминиевой и никелевой проволоки в вакууме (~$1{,}33 \cdot 10^{-3}$ Па) на нагретую до 200 °С подложку на установке УВП-2М2, что обеспечивало в напыляемой пленке содержание никеля ~0,5 % (масс.).

Исследования вышеуказанных тонкопленочных систем проводились методом рентгенофазового анализа в скользящей геометрии, так как запись дифрактограмм при фиксированных углах скольжения рентгеновского пучка в диапазоне от 0,5 до 25° позволяет получать информацию с различной глубины. Метод является неразрушающим и позволяет исследовать интегральные структурные характеристики многослойных композиций, не требует специальной подготовки пленок или предварительной обработки их поверхности.

Для исследований использовали дифрактометр ДРОН-3 с использованием плоского графитового монохроматора на отраженном пучке, при этом применяли CuK_α-излучение. Для установления распределения кристаллографической ориентации алюминиевых пленок по толщине использовали метод «скользящего пучка», основанный на регистрации отраженного рентгеновского излучения при угловом сканировании детектора при фиксированных значениях угла α [5]. Изменяя угол α, варьировали толщину информативного слоя, то есть слоя, отражающего 90 % падающего рентгеновского излучения.

Рассматривалось изменение фазового состава многослойных систем в зависимости от величины угла скольжения α, а также оценивалась структура пленок Al – 0,5 % Ni. Степень кристаллографической ориентации пленок определяли по соотношению интенсивности первых двух линий Al(111) и Al(200) в изучаемом слое $(I_{111}/I_{200})_{\text{экс}}$ и табличными данными $(I_{111}/I_{200})_{\text{таб}}$, взятыми из картотеки ASTM:

$$N = (I_{111}/I_{200})_{\text{экс}} / (I_{111}/I_{200})_{\text{таб}}. \quad (1)$$

При отсутствии ориентации в слое $N = 1$. При $N>1$ в изучаемом слое преобладает ориентация (111), а при $N<1$ – ориентация (100). Причем чем выше степень ориентации (111), тем больше значение N. Построив зависимость $N = f(\alpha)$, можно проследить характер изменения ориентации в пленках от толщины рассеиваемого слоя, температурного воздействия и т. д., то есть ее зависимость от технологии изготовления.

Экспериментальные штрихдиаграммы, отражающие изменение фазового состава по толщине в двухслойных пленках (Al – 0,5 % Ni)/Mo и Mo/(Al – 0,5 % Ni) на подложках из монокремния ориентации (111) представлены на рис. 1, а на композиции SiO_2/Si(111) – на рис. 2.

Система (Al – 0,5 % Ni)/Mo/Si (111). В том случае, когда пленка Al – 0,5 % Ni расположена сверху (рис. 1а), образования каких-либо соединений между этой пленкой и монокремнием не выявлено, так как пленка молибдена служит барьером и препятствует протеканию диффузионных процессов.

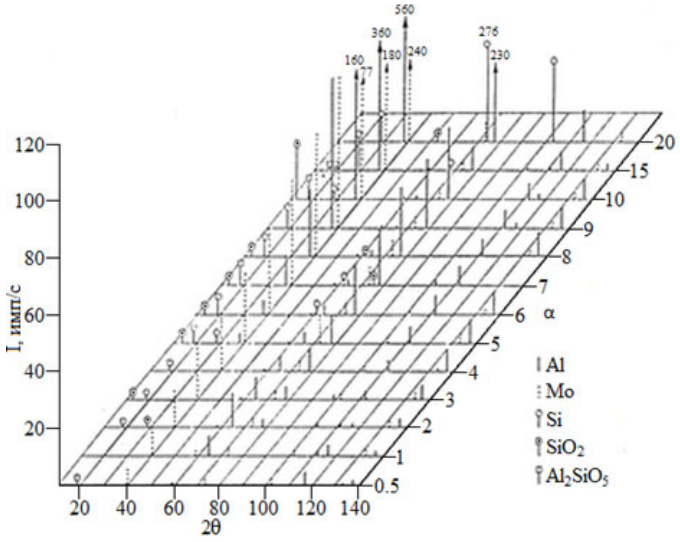
Наиболее существенные изменения, однако, наблюдаются в ориентации зерен пленки Al – 0,5 % Ni. На основании отношения интенсивностей линий 111 и 200 можно заключить, что зерна алюминия имеют в основном преимущественную ориентацию в плоскости (111), изменение которой с ростом угла α отражено в табл. 1.

В области углов α от 0,5° до 8,0° имеется три угла (1°, 4° и 7°), в которых отношения интенсивностей линий 111 и 200 выше, чем для других углов, но особенно выделяется максимум (α = 15°), расположенный в области границы раздела двух пленок: алюминия и молибдена. В работе [5] при исследовании однослойных пленок сплавов алюминия было показано, что степень кристаллографической ориентации зерен этих пленок зависит главным образом, от типа, концентрации примеси и температуры отжига. При этом установлено, что при малой концентрации примеси исходное состояние пленки можно было характеризовать как нетекстурированное, так как только в узкой переходной области пленки-подложки наблюдалось

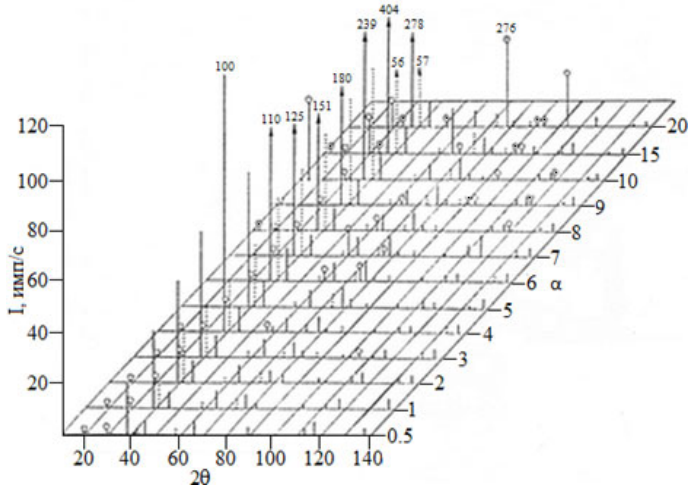
появление ориентации зерен пленки алюминия в плоскости (111), незначительно возрастающей по мере приближения к границе раздела.

Для системы (Al – 0,5 % Ni)/Mo/Si высокий уровень преимущественной ориентации зерен алюминия в плоскости (111), особенно в переходной области алюминий – молибден, обусловлен напряжениями, возникающими в пленках Al и Mo при их наращивании из-за структурного несоответствия и различия коэффициентов теплового расширения пленок и подложки.

Дополнительными источниками напряжений являются: окисные фазы и другие включения, имеющиеся в пленках, наличие растворенных атомов никеля и газов, неоднородно распределенных в алюминиевой пленке, замораживание структурных дефектов в решетке пленки в процессе конденсации, а также поверхностное натяжение на границе «пленка – внешняя среда». Эти напряжения приводят к пластической деформации этой области, по сравнению с остальным объемом пленки, и тем самым сказываются на последующих процессах возврата и рекристаллизации [1].

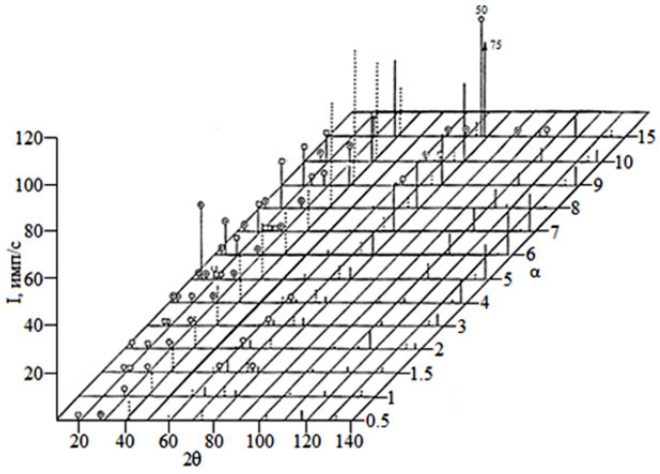


а)

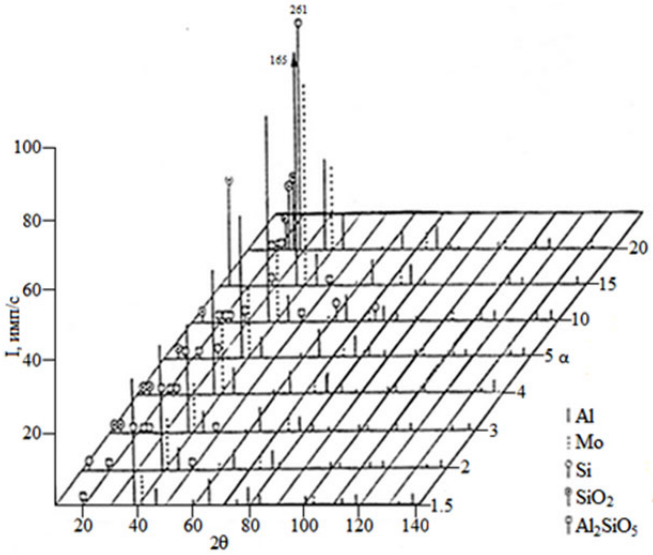


б)

Рисунок 1. Штрихдиаграммы, отражающие изменение фазового состава по толщине в двухслойных пленках (Al – 0,5 % Ni)/Mo (*а*) и Mo/(Al – 0,5 % Ni) (*б*) на подложках Si(111) (цифры около некоторых линий показывают их интенсивность в имп/с)



а)



б)

Рисунок 2. Штрихдиаграммы, отражающие изменение фазового состава по толщине в двухслойных пленках Mo/(Al – 0,5 % Ni) (*а*) и (Al – 0,5 % Ni)/Mo (*б*) на композиции SiO_2/Si(111) (цифры около некоторых линий показывают их интенсивность в имп/с)

Таблица 1 – Отношение относительной интенсивности рентгеновских линий $(I_{111}/I_{200})_{экс}$ / $(I_{111}/I_{200})_{таб}$ пленки Al – 0,5 % Ni в зависимости от ее положения в системах (Al – 0,5 % Ni)/Mo/Si(111), (Al – 0,5 % Ni)/Mo/SiO_2/Si(111), Mo/(Al – 0,5 % Ni)/Si(111) и угла скольжения рентгеновского пучка α

Система	**Угол скольжения рентгеновского пучка α, °**	**$(I_{111}/I_{200})_{экс}/(I_{111}/I_{200})_{таб.}$**
(Al – 0,5 % Ni)/Mo/Si	0,5	1,4
	1,0	1,8
	2,5	1,7
	3,0	2,2
	4,0	4,6
	5,0	3,0
	6,0	3,1

	7,0	4,0
	8,0	3,1
	15,0	11,0
	20,0	8,6
(Al – 0,5 %Ni) /Mo/SiO_2/Si	0,4	0,9
	1,0	0,9
	3,0	1,6
	4,0	1,2
	6,0	2,4
	10,0	4,3
	15,0	1,6
	20,0	7,0
Mo/(Al – 0,5 %Ni)/Si	5,0	2,3
	6,0	4,0
	7,0	11,0

Примечание: отношение относительной интенсивности рентгеновских линий $(I_{111}/I_{200})_{экс}$ / $(I_{111}/I_{200})_{таб}$ *приведено до отжига*

Это согласуется с результатами, см., например, [4], где утверждается, что «как правило, тонкие поликристаллические пленки обладают в большей или меньшей степени развитой аксиальной (осесимметричной) однокомпонентной или многокомпонентной текстурой с той или иной степенью рассеяния». При этом текстура в ТПП связана с механизмом и кинетикой их получения, и она формируется под действием температурных либо концентрационных градиентов как непосредственно при наращивании пленок, так и при последующих термообработках.

Следует помнить, что текстурой называется преимущественное кристаллографически ориентированное относительно внешней системы координат расположение кристаллитов в поликристаллических материалах (изделиях). Практический интерес к текстурам, однако, связан с тем, что они вызывают анизотропию свойств.

При этом если практически все кристаллиты поликристаллического материала имеют одну преимущественную ориентировку, то текстуру называют однокомпонентной. Если в поликристалле имеется несколько групп кристаллитов, каждой из которых присуща своя ориентировка, то такую текстуру принято называть многокомпонентной.

Система Mo/(Al – 0,5 % Ni)/Si(111). Картина существенным образом меняется, когда пленка Al – 0,5 % Ni наносится непосредственно на кремниевую подложку ориентации (111), а сверху наносится пленка Mo. Отсутствие барьерного слоя приводит к образованию фазы Al_2SiO_5 (рис. 1б), концентрация которой возрастает с ростом угла скольжения α, то есть по мере приближения к границе раздела «пленка-подложка». При исследовании, однако, однослойных пленок сплавов алюминия были зарегистрированы только следы Al_2SiO_5 [5].

Значительные изменения наблюдаются также и в кристаллографической ориентации зерен пленки Al – 0,5 % Ni. Так, например, поверхностному слою пленки Al – 0,5 % Ni или, точнее, приграничной области раздела молибден – алюминий свойственна ориентация (110), которая затем переходит в ориентацию (311). Появление и усиление дифракционной линии (311) наблюдалось синхронно с появлением и усилением линий фазы Al_2SiO_5. Это может служить косвенным доказательством того, что в этом случае знак и уровень напряжений в пленках будут другими.

По мере приближения к границе раздела «пленка-подложка» (начиная с $\alpha = 5°$, табл. 1) дополнительно появляется и усиливается ориентация (111). Таким образом, эта область пленки Al – 0,5 % Ni характеризуется двойной кристаллографической ориентацией (111)·(311). Степень ориентации (111) резко возрастает с приближением к границе раздела (табл. 1, система Mo/(Al – 0,5 % Ni)/Si), превышающей уровень ориентации, наблюдаемый в первом случае. Следовательно, наличие пленки молибдена сверху пленки алюминия приводит к образованию сложной ориентации с сильным изменением ее по толщине пленки Al – 0,5 % Ni.

Система (Al – 0,5 % Ni)/Mo/SiO_2/Si(111). Отличие четырехслойных систем от трехслойных систем состоит в наличии слоя SiO_2 толщиной ~0,3 мкм, получаемого термическим окислением подложек монокремния ориентации (111), на которые наносились металлические пленки. Штрихдиаграммы этих пленок приведены на рис. 2.

В системе (Al – 0,5 % Ni)/ Mo/SiO_2/Si, то есть когда пленка Al – 0,5 % Ni расположена сверху, в ней ярко выражена ориентация (111) (табл. 1). Анализ распределения кристаллографической ориентации (111) по толщине пленки Al – 0,5 % Ni в трехслойной и четырехслойных системах показал, что максимальные значения относительной интенсивности рентгеновских линий 111 и 200, расположенные на определенных глубинах пленки Al – 0,5 %Ni в трехслойной системе, заменяются в четырехслойной на минимальные [6]. Особенно это изменение существенно для экстремума, расположенного в области границы раздела (Al – 0,5 % Ni)/Mo (табл. 1). Очевидно, что для системы (Al – 0,5 % Ni)/Mo/SiO_2/Si наличие слоя диоксида кремния благодаря вязкотекучим свойствам последнего снижает воздействие молибдена на кремний и уменьшает величину макронапряжений в системе Mo/Si. Чем меньше макронапряжение, тем меньше пластическая деформация области границы раздела (Al – 0,5 % Ni)/Mo, и, как следствие, значительно меньше степень ориентации зерен пленки Al – 0,5 % Ni в плоскости (111) на этой границе раздела для четырехслойной системы по сравнению с трехслойной [6].

Система Mo/(Al – 0,5 % Ni)/SiO_2/Si(111). Отличительной особенностью системы Mo/(Al – 0,5 % Ni)/SiO_2/Si является более сложный фазовый состав переходной области (Al – 0,5 % Ni)/SiO_2 (рис. 2а). Вблизи границы раздела надежно регистрируется фаза диоксида кремния в виде квазимонокристаллического или сильно текстурированного слоя меланофлогита (диоксид кремния, содержащий органические вещества [7, 8]), имеющего кубическую структуру и соединение Al_2SiO_5. Формула меланофлогита: $46[SiO_2]·6[CO_2, N_2]·2[CH_4, N_2]$. Сингония: кубическая.

По мере удаления от границы раздела (Al – 0,5 % Ni)/SiO_2 кубическая структура диоксида кремния заменяется псевдогексагональной структурой тридимита.

Отличие фазового состава системы (Al – 0,5 % Ni)/Mo/SiO_2/Si от Mo/(Al – 0.5 % Ni)/SiO_2/Si состоит в отсутствии соединения Al_2SiO_5 и образовании слоя кубической квазимонокристаллической структуры меланофлогита меньшей толщины [6].

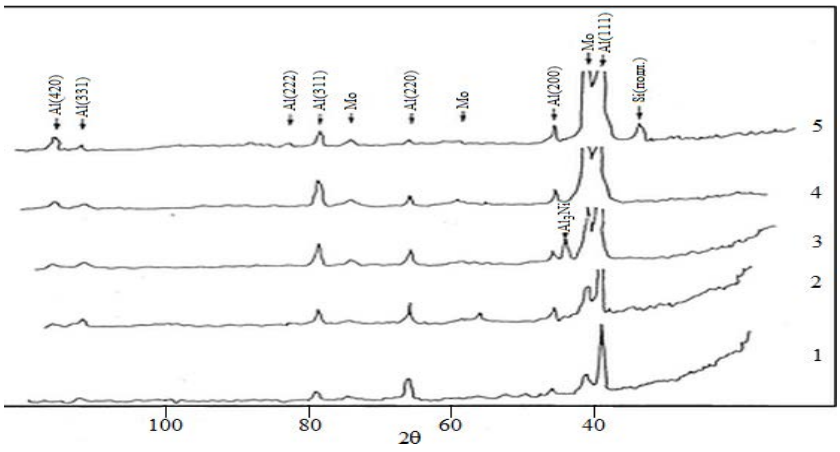
Структурное совершенство Al – 0,5 % Ni пленок в многослойных системах и физико-химические свойства пленок. Высокая степень кристаллографической ориентации определенных слоев пленки Al – 0,5 % Ni приводит к тому, что изотропность свойств, присущая для поликристаллического состояния материала, исчезает. Появление четко выраженной кристаллографической ориентации влияет на такие физико-химические свойства, как поверхностная энергия, модуль упругости и др. [9]. Алюминий, однако, имеет гранецентрированную кубическую решетку, при этом плоскости (111) обладают минимальной поверхностной энергией, а плоскости (110) – большей и поэтому химически более активны. Следовательно, они более активны при контактировании с другими материалами и окружающей средой. Низкое значение поверхностной энергии приводит к тому, что адгезионные свойства этих плоскостей также имеют минимальное значение, а максимальное значение модуля упругости наблюдается в направлении, перпендикулярном к плоскости (111). Следовательно, при решении проблемы адгезии, например тонких полиамидных пленок к материалам эле-

ментов СВЧ-транзисторных структур, в частности к пленкам алюминия, это необходимо учитывать [10-12]. Кроме того, алюминиевые пленки с оптимальной структурой: с незначительным разбросом размеров зерен и с сильной преимущественной ориентацией зерен, в частности в плоскости (111), позволяют увеличить среднее время электромиграционного срока службы (безотказной работы) и энергию активации отказа тонких алюминиевых пленок вследствие электромиграции алюминия [13, 14]. Ориентация поверхности алюминиевой пленки влияет и на кинетику сегрегации примеси. Как правило, на плоскостях плотной упаковки атомов и низкой поверхностной энергии сегрегация примеси выражается менее ярко. Растворенные в объеме примесные атомы скапливаются в первую очередь у плоскостей с низкой атомной плотностью и высокой поверхностной энергией. Образование сильной ориентации поверхностного слоя, переходной области или какой-либо другой зоны пленки может приводить к локализации примеси в определенном месте.

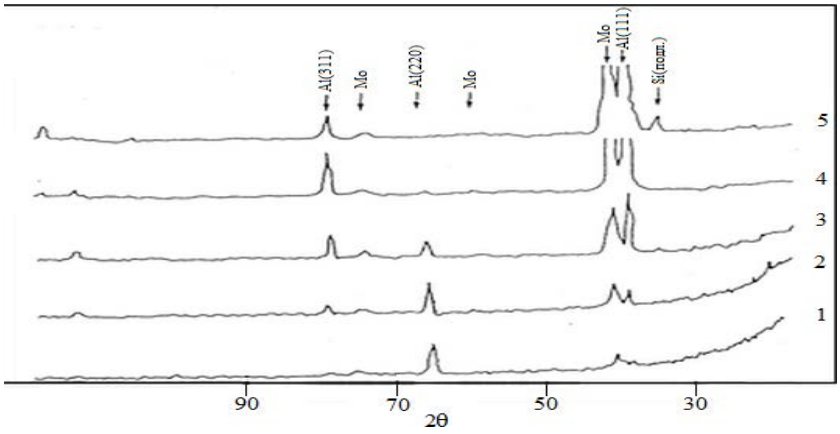
Следовательно, создавая определенную ориентацию и меняя характер ее распределения по толщине пленки, можно управлять физико-химическими свойствами пленок [6].

Влияние отжига двухслойных металлических пленок (Al – 0,5 % Ni)/Mo на подложках кремния ориентации (111) на их фазовый состав и структурное совершенство Al – 0,5 %Ni пленок. Результаты второй серии экспериментов, посвященных изучению влияния отжига двухслойных пленок (Al – 0,5 % Ni)/Mo на подложке кремния ориентации (111) на ее фазовый состав и ориентацию зерен Al – 0,5 % Ni пленок, представлены на рис. 3. Отжиг образцов продолжительностью 1 ч проводили в атмосфере кислорода при температуре 50, 150, 370 и 500 °С. Анализ дифрактограмм образцов при температуре отжига 50 °С выявил сильную ориентацию зерен алюминия в плоскости (111) во всем объеме пленки Al – 0,5 % Ni и наличие локализованной фазы Al_3Ni. Повышение температуры отжига до 150 °С привело к появлению в приповерхностном слое пленки Al – 0,5 % Ni ориентации (110) вместо (111). Кроме того, отжиг при температуре 150 °С приводит к увеличению доли компонент (111) и (311) в пленке и «исчезновению» фазы Al_3Ni. Это связано с тем, что наличие в пленках часто встречающейся четкой текстуры (одно- или многокомпонентной) самая интенсивная линия может отсутствовать, а слабая – стать наиболее сильной, интенсивной, см., например, [4]. Дальнейшее повышение температуры отжига не привело к выявлению каких-либо соединений в системе (Al – 0,5 % Ni)/Mo/Si, наблюдалось только усиление ориентации (111) при сохранении ориентации (110) в поверхностном слое пленки Al – 0,5 % Ni. Отжиг системы при 500 °С привел к существенным изменениям в составе. Образовались соединения типа Al_2SiO_5 и $MoAl_{1,3}Si_{0,7}$, что связано с интенсивным протеканием диффузионных процессов. При этом поверхностный слой пленки характеризуется ориентацией (100), а переходная область – (111). Исследования фазового состава системы Al/Mo/Si, подвергнутой отжигу в аргоне при температуре 550 °С в течение 15 мин., были также проведены в работе [15]. При этом было показано, что в процессе отжига значительного взаимодействия слоев не происходит, о чем свидетельствуют результаты рентгенодифрактометрических исследований, не выявивших откликов интерметаллидов молибдена с алюминием и с кремнием в пленках.

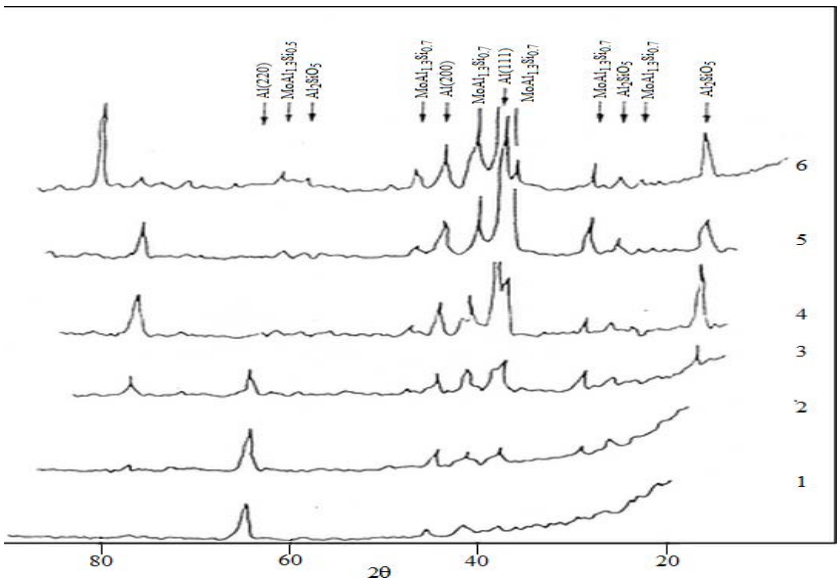
Влияние отжига системы Al/Mo/Al/Si(111) в атмосфере кислорода на плотность поверхностного слоя пленок алюминия. В результате взаимодействия поверхности металла (сплава) с кислородом, водой или другими окислителями на границе между твердой и газообразной фазами возникает слой оксида, разделяющий реагирующие вещества. Механизм образования такого оксида – сложный. Для его выяснения нужно знать структурные характеристики оксида и параметры диффузии атомов, ионов и электронов, вступающих в реакцию продуктов. Тем не менее появление такого оксида может сильно изменить эксплуатационные свойства изделий, сократить или увеличить срок их службы и др.



а)



б)



в)

Рисунок 3. Дифрактограммы двухслойных пленок (Al – 0,5 % Ni)/Mo на подложке Si(111) после отжига: (*а*) – $T_{отж}$ = 50 °C; (*б*) – $T_{отж}$ = 150 °C; (*в*) – $T_{отж}$ = 500 °C; значение α = 1° (*1*); 2° (*2*); 5° (*3*); 10° (*4*); 15° (*5*); 20° (*6*)

Методом рентгеновской рефлектометрии [16] исследовали плотность поверхностного слоя пленок алюминия с помощью рентгеновского рефлектометра, собранного на базе дифрактометра УРС-50 ИМ. Условия съемки: I = 5 мА, U = 15 кВ. Съемку производили в излу-

чении CuK_{α}. При этом к кремниевой подложке предъявляются специальные требования к кривизне поверхности. Это означает, что плоскостность и шероховатость измеряемой поверхности образца должны быть такими, чтобы вносимые искажения не приводили к увеличению полуширины профиля зеркального отражения более чем в 1,5 раза и уменьшению интенсивности зеркального отражения более чем в 5 раз [17].

Поэтому в качестве подложки использовались пластины кремния марки КЭФ 10/0,1(111), вырезанные из слитка диаметром 40 мм, которые исходно были легированы фосфором до получения удельного сопротивления 10 Ом·см, имеющие толщину 5 мм. При этом поверхность пластин подвергалась оптической полировке, на которую в последующем осаждали многослойную систему Al/Mo/Al. Использование толстых подложек позволяет избежать значительных отклонений от плоскостности за счет напряжений, возникающих после нанесения пленок, и таким образом уменьшить погрешность измерения критического угла полного внешнего отражения рентгеновских лучей, по величине которого определяется плотность поверхностного слоя пленки по следующим формулам [18, 19].

Для одноэлементных веществ плотность материала связана с электронной плотностью по формуле:

$$n_e = f \cdot n_\alpha = f \cdot (N_a/A)\rho ,$$

где – электронная плотность; ρ – плотность массивного материала; f – атомный фактор рассеяния; $\cdot n_\alpha$ – атомная концентрация; N_a – число Авогадро; A – атомная масса.

Для практических целей при исследовании изменений плотности поверхностного слоя в результате какого-либо воздействия удобно пользоваться следующим соотношением [6]:

$$\rho_x = \rho_m(\theta_{exp}/\theta_{cr}),^2$$

где ρ_m – табличное (или исходное) значение плотности материала; θ_{cr} – критический угол, вычисленный (или измеренный) для образца в исходном (монолитном) состоянии; θ_{exp} – критический угол исследуемого образца.

Точность определения критического угла полного внешнего отражения рентгеновских лучей составляла ± 5", при этом максимальная ошибка при расчете плотности не превышала 1 %. Расчетная глубина проникновения рентгеновского пучка не превышала 30 нм. Образцы для исследований представляли собой нанесенные на кремниевые подложки с ориентацией (111) трехслойные пленки Al/Mo/Al, выполняющие роль невыпрямляющих контактов к активным областям СВЧ-транзисторов. Пленки алюминия, молибдена и снова алюминия многослойной системы Al/Mo/Al получали термическим испарением в вакууме не хуже $2{,}66 \cdot 10^{-3}$ Па в одном процессе без разгерметизации вакуумной камеры [20]. При этом нижний слой алюминия создает низкоомный невыпрямляющий контакт к n^+– кремнию (эмиттер транзистора) и имеет толщину 30-50 нм, второй слой – молибдена – служит барьерным слоем и имеет толщину 70-100 нм, третий – верхний слой из нелегированного алюминия – является токоведущим слоем и имеет толщину 800-900 нм. Нанесение пленок производится в едином вакуумном цикле для снижения переходного сопротивления между слоями металлов. Отжиг образцов Al/Mo/Al/Si продолжительностью 1 ч проводили в атмосфере кислорода при температурах 25, 75, 100, 200, 300, 370, 400 и 450 °С. Толщину оксида алюминия на поверхности алюминиевых пленок измеряли с помощью лазерного эллипсомера ЛЭМ-2 с точностью ± 3 нм.

Исследования поверхностного слоя алюминиевой пленки методом рентгеновской рефлектометрии свидетельствуют о существенных процессах, протекающих в тонком поверхностном слое при отжиге. В табл. 2 представлены значения плотности, из которых видно, что плотность поверхностного слоя меняется уже при незначительных температурах стационарного отжига. Такие изменения плотности могут быть объяснены наличием различных модификаций оксидов алюминия [6]. В пользу этого аргумента говорит и тот факт, что толщина оксида алюминия находится не в линейной зависимости от плотности окислов алюминия

(табл. 3). Наблюдаемые изменения плотности поверхностного оксидного слоя алюминия в системе Al/Mo/Al/Si хорошо объясняются на основе следующих представлений.

Таблица 2 – Плотность оксидов алюминия и температура отжига системы Al/Mo/Al/Si(111) (время отжига – 1 ч)

Плотность оксидов алюминия, г/см^3	**Температура отжига системы Al/Mo/Al/Si, °C**	**Окислительная среда**
2,87	25	кислород
2,72	75	то же
2.81	100	"
2,91	200	"
2,71	300	"
2,66	370	"
2,72	400	"
2,55	450	"

Поверхностный слой металлических поликристаллических пленок представляет собой сложную гетерогенную систему, состоящую из адсорбированных молекул окружающей среды, неоднородной пленки естественного оксида и переходного слоя металла с искаженной кристаллической решеткой.

Таблица 3 – Толщина оксидов алюминия и температура отжига системы Al/Mo/Al/Si (время отжига – 1 ч)

Толщина оксидов алюминия, нм	**Температура отжига системы Al/Mo/Al/Si, °C**
6	25
5	75
4	100
6	200
4	300
7	370
7	400
6	450

При отжиге его свойства изменяются, главным образом, за счет структурно-фазовых превращений в пленке [6], сопровождающихся появлением градиента макронапряжений, процессами интенсивного дефектообразования в структуре переходного слоя и формированием нового типа текстуры металлической пленки. Дополнительными источниками напряжений в алюминиевых пленках служат полиморфные превращения в оксидном слое, протекающие в широком диапазоне температур и приводящие к существенным изменениям плотности.

Исходя из сопоставления данных по плотности оксидов алюминия от температуры отжига (табл. 2) с известными температурными интервалами полиморфных превращений в гидрооксиде алюминия $Al(OH)_3$ и значениями плотности различных кристаллических модификаций $Al(OH)_3$ [21, 22], полученные экспериментальные данные можно интерпретировать следующим образом.

На поверхности верхнего слоя пленки алюминия непосредственно после осаждения системы Al/Mo/Al на кремний образуется слой сложного состава, состоящий из гидрооксидных и оксидных фаз алюминия [2, 22, 23]. Так, например, в работе [2] утверждается, что на поверхности любого оксида, в том числе оксида алюминия, всегда присутствует структурная вода. Эта вода в большинстве случаев имеет поверхностное происхождение и может входить в решетку оксида в виде ОН-групп, а также в виде молекул – гидраты и оксигидраты. При этом температурные границы удаления воды достаточно высоки.

Помимо структурной воды, свойственной природе оксида, на поверхности всегда присутствуют разнообразные адсорбционные органические загрязнения (контакт с атмосферой, пары масла и т. д.). Например, по данным [23], оксидные пленки на алюминии состоят из внутреннего, компактного, прилегающего к металлу слоя и внешнего, пористого слоя. При этом толщина внутреннего слоя зависит в основном от температуры, а внешнего – от продолжительности реакции и влажности окружающей среды. Кроме этого, некоторые оксиды, в частности Al_2O_3, могут образовывать на алюминии тонкую аморфную пленку [22]. В свою очередь авторы работы [3] считают, что хемосорбцию кислорода в разнообразных случаях на поверхности алюминия можно представить как реальную химическую реакцию с образованием реальных оксидных фаз, приводящих к реконструкции поверхности алюминия.

Под влиянием температурных воздействий происходят существенные колебания плотности окисленного поверхностного слоя пленки алюминия. Уменьшение плотности слоя пленки алюминия при увеличении температуры отжига от комнатной до 75 °С обусловлено образованием гидрооксида алюминия $Al(OH)_3$. Этот вывод подтверждается результатами работы [24], в которой методом масс-спектроскопии вторичных ионов было показано, что при распылении поверхностного слоя образцов алюминия, предварительно выдержанных в вакууме $6{,}65 \cdot 10^{-5}$ Па при температуре 25-100 °С, выход ионов гидрооксида алюминия значительно превышает выход ионов оксида алюминия. Дальнейшее повышение температуры отжига приводит к росту плотности оксидов на поверхности пленки алюминия с максимумом при температуре отжига 200 °С (2,91 г/см^3). Это следует связать с образованием фазы бемита AlO(OH). Этот вывод не противоречит данным работы [21], где показано, что гидрооксид алюминия $Al(OH)_3$ при 180-200 °С превращается в бемит, плотность которого составляет 3,01 г/см^3.

Выводы

1. Снижение величины плотности оксидов при температуре отжига 300 °С и выше может быть обусловлено рядом причин, основными из которых являются: порообразование в пленке, протекающее под влиянием процессов структурно-фазовых превращений и релаксации напряжений; превращение бемита выше 300 °С в Al_2O_3 [21], аморфизация структуры Al_2O_3.

2. Установлена преобладающая роль процесса аморфизации оксидного слоя пленок алюминия в уменьшении плотности по данным измерения толщины этого слоя, показывающим ее увеличение (см. табл. 3), что должно было привести к повышению плотности в случае сохранения кристаллической структуры оксида и не противоречит данным, полученным в работе [25].

3. Появление небольшого максимума плотности поверхностного слоя исследуемых образцов после отжига при температуре 400 °С можно объяснить кристаллизацией аморфной γ-Al_2O_3. Так, существование именно γ-Al_2O_3 в аморфных оксидных пленках на алюминии подтверждено экспериментально (см., например, [3, 22]).

4. Проведенные исследования позволили обнаружить величину плотности образцов при температуре отжига 450 °С, которая составила 2,55 г/см^3, что близко к значению плотности для байерита (2,53 г/см^3).

Таким образом, отжиг системы Al/Mo/Al в среде кислорода существенно влияет на плотность оксидов на поверхности алюминиевой пленки, чему способствует большое сродство алюминия к кислороду и полиморфизм его соединений с кислородом в широком диапазоне температур. Установленный характер изменения плотности оксидов алюминия необходимо учитывать при выборе технологических режимов получения тонкопленочных твердотельных структур и других изделий, содержащих алюминий. Результаты исследований плотности оксидов алюминия на поверхности алюминиевых пленок в результате отжига позво-

лили разработать новый способ создания металлизации СВЧ-транзисторов и новый способ изготовления металлизации интегральных микросхем.

Список литературы

1. Горелик, С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С. С. Горелик. – 2-е издание. – Москва : Металлургия, 1978. – 568 с. – Текст : непосредственный.

2. Киселев, В. Ф. Поверхностные явления в полупроводниках и диэлектриках / В. Ф. Киселев. – Москва : Наука, 1970. – 400 с. – Текст : непосредственный.

3. Емельянов, А. В. Реконструкция поверхности кремния и некоторых металлов при адсорбции кислорода / А. В. Емельянов, В. В. Егоркин, Э. П. Бочкарев. – Текст : непосредственный // Доклады АН СССР. – 1985. – Т. 281, № 4. – С. 866–868.

4. Горелик, С. С. Рентенографический и электронно-оптический анализ: учебное пособие для вузов по направлению «Материаловедение и технология новых материалов» / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – Москва : МИСиС, 1994. – 328 с. – Текст : непосредственный.

5. Распределение текстуры по толщине тонких пленок сплавов алюминия / В. М. Колешко, В. Ф. Белицкий, И. В. Кирюшин [и др.]. – Текст : непосредственный // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1987. – № 12. – С. 76–83.

6. Структурно-фазовая неоднородность алюминиевых пленок в многослойных системах / А. Ф. Заико, Ю. П. Снитовский, Т. В. Башун, В. В. Лагун. – Текст : непосредственный // Микроэлектроника. – 1992. – Т. 21, Вып. 2. – С. 78–86.

7. Skinner, B. J. Melanophlogite, a cubic polymorph of silica / B. J. Skinner, D. E. Appleman // American Mineralogist. – 1963. – Vol. 48, № 7-8. – P. 854–867.

8. Zak, L. A contribution to the crystal chemistry of melanophlogite / L. Zak // American Mineralogist. – 1972. – Vol. 57, № 5-6. – P. 779–796.

9. Бакли, Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном воздействии / Д. Бакли. – Москва : Машиностроение, 1986. – 360 с. – Текст : непосредственный.

10. Сенько, С. Ф. Радиационностойкая система металлизации СБИС / С. Ф. Сенько, Ю. П. Снитовский. – Текст : непосредственный // Радиационная физика твердого тела : труды XI межнационального совещания, Севастополь, 25-30 июня 2001 г. – Москва, 2001. – С. 310–311.

11. Sen'ko, S. F. New VLSI Multilevel Metallization Technology Using Polyimide Insulation / S. F. Sen'ko, Yu. P. Snitovskii // Russian Microelectronics. – 2002. – Vol. 31, № 3. – P. 170–178.

12. Сенько, С. Ф. Адгезия пленок полиимида к компонентам изделий микроэлектроники / С. Ф. Сенько, Ю. П. Снитовский. – Текст : непосредственный // Журнал прикладной химии. – 2006. – Т. 79, Вып. 10. – С. 1701–1705.

13. Д'Эрль, Ф. Электромиграция в тонких пленках / Ф. Д'Эрль, Р. Розенберг. – Текст : непосредственный // Физика тонких пленок. Современное состояние исследований и технические применения : пер. с английского ; сборник статей / под редакцией В. В. Сандомирского, А. Г. Ждана. – Москва, 1977. – Т. 7. – С. 284–339.

14. Yoo, S. Effect of the Ti-underlayer microstructure on the texture of Al thin films / S. Yoo, Y-H. Kim, C. S. Yoon // Journal of Vacuum Science and Technology (B). – 2001. – Vol. 19, № 3. – P. 856–858.

15. Структурно-морфологические и электрофизические свойства контактов к кремнию на основе алюминия с барьерными слоями / Е. Л. Сакович, В. П. Лесникова, Л. Я. Портнов [и др.]. – Текст : непосредственный // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1994. – № 3. – С. 44–53.

16. Синайский, В. М. Рентгеновская рефлектометрия / В. М. Синайский, В. И. Сиденко. – Текст : непосредственный // Приборы и техника эксперимента. – 1974. – № 6. – С. 5–13.

17. Румак, Н. В. Изучение неоднородности строения термических пленок SiO_2 методом полного внешнего отражения рентгеновских лучей / Н. В. Румак, А. Ф. Заико. – Текст : непосредственный // Вестник АН БССР. Серия физико-тэхнических. навук. – 1985. – № 1. – С. 28–32.

18. Прецизионное измерение плотности и толщины маскирующих органических пленок / А. Ф. Заико, Ю. И. Гудименко, И. В. Резников, В. Е. Агабеков. – Текст : непосредственный // Микролитография : тезисы докладов II Всесоюзного семинара. – Черноголовка, 1988. – С. 145.

19. Мельник, В. Л. Определение плотности металлов методами полного внешнего отражения рентгеновских лучей и двойного кристалл-спектрометра / В. Л. Мельник. – Текст : непосредственный // Заводская лаборатория. – 1979 – Т. 45, № 5. – С 429–431.

20. Кремниевые транзисторы КТ909А и КТ909Б с выходной мощностью 20-25 и 40-60 Вт на частоте 500 МГц / В. И. Диковский [и др.]. – Текст : непосредственный // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1972. – Вып. 5. – С. 31–41.

21. Химия. Большой энциклопедический словарь / главный редактор И. Л. Кнунянц. – Москва : Большая Российская энциклопедия. – 2000. – 792 с. – Текст : непосредственный.

22. Канье, М. Экспериментальные данные о структуре окисных слоев / М. Канье. – Текст : непосредственный / М. Канье. – Текст : непосредственный // Окисление металлов : перевод с французского : в 2 томах / под редакцией Ж. Бенара. – Москва, 1968. – Т. 1. – С. 366–426.

23. Удар, Ж. Легкие металлы / Ж. Удар, Ж. Пойдасси. – Текст : непосредственный // Окисление металлов перевод с французского : в 2 томах / под редакцией Ж. Бенара. – Москва, 1968. – Т. 2. – С. 311–328.

24. Зависимость состава поверхностных соединений алюминия от его объемных загрязнений и температуры / А. Г. Коваль [и др.]. – Текст : непосредственный // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. – 1977. – Вып. 1. – С. 16–24.

25. Румак, Н. В. Влияние температуры отжига на плотность поверхностного слоя пленок алюминия / Н. В. Румак, А. Ф. Заико. – Текст : непосредственный // Доклады АН БССР. – 1986. – Т. 30, № 10. – С. 913–916.

26. Патент SU 1069571, МПК H01L 21/28 (2006.01). Способ создания металлизации СВЧ-транзисторов : № 343933/25 : заявл. 14.05.1982 : опубл. 10.05.2012 / Гурский Л. И., Заико А. Ф., Румак Н. В. [и др.]. – 1 с. – Текст : непосредственный.

27. Патент SU 1241937, МПК H01L 21/28 (2006.01). Способ изготовления металлизации интегральных микросхем : № 3805834/25 : заявл. 29.10.1984 : опубл. 10.05.2012 / Гурский Л. И., Снитовский Ю. П., Румак Н. В., Заико А. Ф. – 1 с. – Текст : непосредственный.

28. Бороненко, М. П. Телевизионная измерительная система наносекундного разрешения / М. П. Бороненко, П. Ю. Гуляев. – Текст : непосредственный // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 1 (31). – С. 60–64.

29. Измерение скорости и температуры частиц в потоке низкотемпературной плазмы / М. П. Бороненко, И. П. Гуляев, П. Ю. Гуляев, А. Е. Серегин. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57, № 3-2. – С. 70–73.

30. Dolmatov, A. V. Investigation of structure formation in thin films by means of optical pyrometry / A. V. Dolmatov, I. V. Milyukova, P. Y. Gulyaev. – DOI 10.1088/1742-6596/1281/1/012010 // Journal of Physics: Conference Series, Saint Petersburg, 14-16.05.2019. – Saint Petersburg : Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012010.

31. Григорьевская, А. А. Компьютерный эксперимент верификации инвариантных свойств Trace-критерия спиновой неустойчивости / А. А. Григорьевская. – Текст : непосредственный // Математика : материалы LIX Международной научной студенческой конференции, Новосибирск, 12-23.02.2021. – Новосибирск : Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2021. – С. 94–95.

32. Criteria for spin instability based on the node distribution in Trace-transform of the SHS / A. Grigoryevskaya, V. Jordan, I. Shmakov, P. Gulyaev. – DOI 10.1088/1742-6596/1745/1/012065 // Journal of Physics: Conference Series : 6, Samara, 26-29.05.2020. – Samara, 2021. – P. 012065.

33. Цуи, Х. Ж. Сценарии структурообразования в волне горения системы Ni-Al с упрочняющими добавками / Х. Ж. Цуи, А. А. Григорьевская, П. Ю. Гуляев. – DOI 10.17816/byusu20200241-49. – Текст : непосредственный // Вестник Югорского государственного университета. – 2020. – № 2 (57). – С. 41–49.

34. Gulyaev, P. Experimental observation of the instability mode in the combustion wave by the differential chronoscopy method / P. Gulyaev, A. Grigoryevskaya, V. Jordan. – DOI 10.1109/EFRE47760.2020.9241952 // VII International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2020), Virtual, Tomsk, Russia, 14-26.09.2020. – Tomsk : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 1227–1231.

35. Equipment and technologies of air-plasma spraying of functional coatings / V. Kuzmin, I. Gulyaev, D. Sergachev [et al.]. – DOI 10.1051/matecconf/201712901052 // MATEC Web of Conferences, Sevastopol, 11-15.09.2017. – Sevastopol : EDP Sciences, 2017. – P. 01052.

36. Солоненко, О. П. Плазменная обработка и напыление порошков оксидов металлов, состоящих из полых сфер / О. П. Солоненко, И. П. Гуляев, А. В. Смирнов. – Текст : непосредственный // Письма в Журнал технической физики. – 2008. – Т. 34, № 24. – С. 22–27.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 г. Выпуск 1 (64). С. 59–66

УДК 621.317.1
DOI: 10.18822/byusu20220159-66

РАЗРАБОТКА РЕКУРСИВНОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Долгих Надежда Николаевна
старший преподаватель Высшей инжиниринговой школы
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»,
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: n_dolgikh@ugrasu.ru

Дюба Елена Александровна
старший преподаватель Высшей инжиниринговой школы
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»,
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: e_dyuba@ugrasu.ru

Осипов Дмитрий Сергеевич
доктор технических наук, профессор,
руководитель Высшей инжиниринговой школы
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»,
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: d_osipov@ugrasu.ru

Цифровая трансформация электроэнергетики является одной из приоритетных задач развития отрасли. Вейвлет преобразование находит широкое применение в электроэнергетике для анализа динамики сложных нелинейных нестационарных процессов. В статье предложена методика расчета переходных процессов в электрических сетях, основанная на рекурсивном алгоритме. В качестве задающего сигнала напряжения (э.д.с.) применяются аппроксимирующие и детализирующие вейвлет коэффициенты дискретного вейвлет преобразования. Для выбора оптимальной вейвлет функции предложено использовать критерий, учитывающий точность восстановления сигнала в результате обратного вейвлет преобразования. Показан характер изменения результата расчета при увеличении количества итераций. Результаты численного эксперимента для сети 110 кВ при расчете трехфазного короткого замыкания, показали приемлемую точность разработанной методики. Предложенная методика позволяет сжимать объемы передаваемых цифровых данных о нормальных и аварийных режимах электрических сетей.

Ключевые слова: вейвлет преобразование, переходные процессы, короткое замыкание, цифровой сигнал.

DEVELOPMENT OF A RECURSIVE MODEL FOR THE CALCULATION OF TRANSIENT PROCESSES IN ELECTRIC NETWORKS USING THE WAVELET TRANSFORMATION

Nadezhda N. Dolgikh
Senior Lecturer of the Higher Engineering School,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: n_dolgikh@ugrasu.ru

Elena A. Dyuba
Senior Lecturer of the Higher Engineering School,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: e_dyuba@ugrasu.ru

Dmitry S. Osipov
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Higher Engineering School
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: d_osipov@ugrasu.ru

The digital transformation of the electric power industry is one of the priority tasks for the development of the industry. Wavelet transform is widely used in the electric power industry to analyze the dynamics of complex non-linear non-stationary processes. The article proposes a method for calculating transient processes in electrical networks based on a recursive algorithm. The approximating and detailing wavelet coefficients of the discrete wavelet transform are used as the voltage signal. To select the optimal wavelet function, it is proposed to use a criterion that takes into account the accuracy of the signal recovery as a result of the inverse wavelet transform. The nature of the change in the calculation result with an increase in the number of iterations is shown. The results of a numerical experiment for a 110 kV network when calculating a three-phase short circuit showed an acceptable accuracy of the developed technique. The proposed technique makes it possible to compress the volume of transmitted digital data on normal and emergency modes of electrical networks.

Keywords: Wavelet transform, transients, short circuit, digital signal.

Введение

Вейвлет преобразование находит все более широкое применение для решения актуальных задач электросетевого комплекса – для анализа данных нормальных, аварийных и послеаварийных режимов, прогнозирования электрических нагрузок [1], расчета переходных процессов, диагностики электротехнического оборудования [2], анализа показателей качества электроэнергии [4] и др. В результате вейвлет преобразования сигнала производится вычисление вейвлет коэффициентов, характеризующих различные частотные компоненты. При задании порогового уровня энергии спектра вейвлет коэффициента, можно с достаточной степенью точности сжать сигнал путем обнуления малозначимых частотных составляющих. Таким образом, любой сложный несинусоидальный нестационарный сигнал, характеризующий режим работы электрической сети может быть достаточно полно представлен набором вейвлет коэффициентов. В настоящей работе представлен алгоритм расчета переходных процессов на примере симметричного трехфазного короткого замыкания на основе вейвлет коэффициентов вынуждающей силы.

Результаты и обсуждение

В настоящее время уже накоплен определенный опыт применения вейвлет преобразования для анализа коротких замыканий и замыканий на землю[6, 8].

Рассмотрим простейшую сеть, состоящую из трансформатора, линии и нагрузки в однофазном исполнении (рисунок 1), для которой произведем расчет короткого замыкания в конце линии.

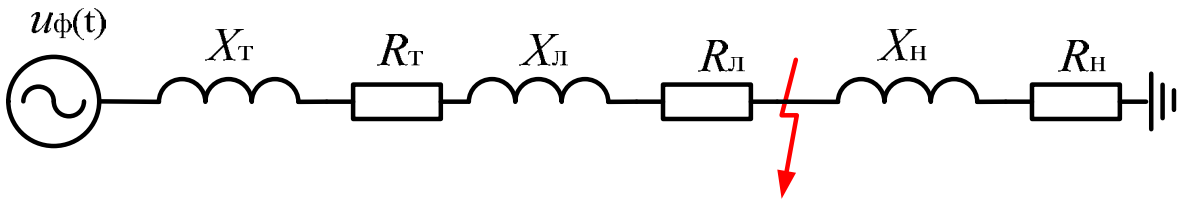


Рисунок 1. Исследуемая схема замещения цепи

Для условия металлического (без дуги) короткого замыкания, при условии, что напряжение источника в момент замыкания проходит через ноль (в этом случае обеспечивается максимальный уровень апериодической составляющей тока замыкания), дифференциальное уравнение переходного процесса может быть представлено в следующем виде:

$$U_{\max\phi}\cdot\sin\left(\omega t+\alpha\right)=i_A\left(R_T+R_Л\right)+\frac{\left(X_T+X_Л\right)}{\omega}\frac{di_A}{dt}. \quad (1)$$

В результате вейвлет преобразования, напряжение фазы А может быть выражено через аппроксимирующие (A) и детализирующие (D) вейвлет коэффициенты в соответствии с выражением:

$$U_{\max\phi}\sin\left(\omega t+\alpha\right)=\sum_{k=-\infty}^{\infty}u_{j,k}^{A}\varphi_{j,k}\left(t\right)+\sum_{j=1}^{\infty}\sum_{k=-\infty}^{\infty}u_{j,k}^{D}\psi_{j,k}\left(t\right). \quad (2)$$

Вейвлет преобразование позволяет производить сжатие объемов передаваемых данных. Степень сжатия определяется глубиной вейвлет разложения. Алгоритмы вейвлет сжатия параметров нестационарных режимов в электрических сетях и системах электроснабжения представлены в работе [7].

Производная тока фазы А di_A/dt в дискретном времени при конечно-разностной аппроксимации:

$$\frac{X_T+X_Л}{\omega}\frac{di_A}{dt}=\frac{X_T+X_Л}{\omega}\frac{i_A\left(t\right)-i_A\left(t+\Delta t\right)}{\Delta t}. \quad (3)$$

Принимая во внимание выражения (2, 3), уравнение (1) может быть переписано в следующем виде:

$$\frac{i_A\left(t\right)-i_A\left(t+\Delta t\right)}{\Delta t}+\frac{\omega R}{X_T+X_Л}i_A\left(t\right)=\frac{\omega}{X_T+X_Л}\left(\sum_{k=-\infty}^{\infty}u_{j,k}^{A}\varphi_{j,k}\left(t\right)+\sum_{j=1}^{\infty}\sum_{k=-\infty}^{\infty}u_{j,k}^{D}\psi_{j,k}\left(t\right)\right). \quad (4)$$

Ток короткого замыкания фазы А, по аналогии с напряжением (2) может быть представлен рядом аппроксимирующих и детализирующих вейвлет коэффициентов. При этом каждый ряд состоит из k элементов для соответствующего уровня (глубины) вейвлет разложения j:

$$i_A\left(t\right)=\sum_{k=-\infty}^{\infty}i_{Aj,k}^{A}\varphi_{j,k}\left(t\right)+\sum_{j=1}^{\infty}\sum_{k=-\infty}^{\infty}i_{Aj,k}^{D}\psi_{j,k}\left(t\right). \quad (5)$$

Если в уравнение (4) ток замыкания фазы А представить вейвлет коэффициентами на основании выражения (5) для малых приращений Δt, то для каждой последовательности вейвлет коэффициентов можно получить следующие выражения, позволяющие рекурсивным методом определить ток короткого замыкания:

$$\frac{\sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^{A}\varphi_{j,k}(t)-\sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^{A}\varphi_{j,k}(t-\Delta t)}{\Delta t}+\frac{\omega(R_T+R_Л)}{X_T+X_Л}\left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^{A}\varphi_{j,k}(t)\right)= \\ =\frac{\omega}{X_T+X_Л}\left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^{A}\varphi_{j,k}(t)\right), \tag{6}$$

$$\frac{\sum_{j=1}^{\infty}\sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^{D}\psi_{j,k}(t)-\sum_{j=1}^{\infty}\sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^{D}\psi_{j,k}(t-\Delta t)}{\Delta t}+\frac{\omega(R_T+R_Л)}{X_T+X_Л}\left(\sum_{j=1}^{\infty}\sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^{D}\psi_{j,k}(t)\right)= \\ =\frac{\omega}{X_T+X_Л}\left(\sum_{j=1}^{\infty}\sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^{D}\psi_{j,k}(t)\right). \tag{7}$$

При выборе глубины вейвлет разложения следует принимать во внимание, что вейвлет функция $\varphi_{j,k}(t)$ и масштабирующая функция $\psi_{j,k}(t)$ должны полностью «перекрыть» исследуемый интервал времени Δt:

$$\varphi_{j,k}(t)=a_0^{-j/2}\varphi\left[a_0^{-j}t-kb_0\right] \quad \varphi_{j,k}(t)=a_0^{-j/2}\varphi\left[a_0^{-j}(t-\Delta t)-kb_0\right], \\ \psi_{j,k}(t)=a_0^{-j/2}\psi\left[a_0^{-j}t-kb_0\right] \quad \psi_{j,k}(t)=a_0^{-j/2}\psi\left[a_0^{-j}(t-\Delta t)-kb_0\right]. \tag{8}$$

Для решения конкретных практических задач необходимо предварительно выбрать оптимальную вейвлет функцию и глубину разложения сигнала. Для этого может быть использован критерий (8), сформулированный в работе [3].

$$\begin{cases} \sigma=\sqrt{\dfrac{\sum_{k=1}^{n}\left(i_k-\hat{i}_k\right)^2}{\sum_{k=1}^{n} i_k^2}}\to\min; \\ \Delta_{En}=\dfrac{E_n}{E_\Sigma}\dfrac{\sum_{k=n}\left|i_{j,k}^{A}\right|^2+\sum_{k=n}\left|i_{j,k}^{D}\right|^2}{\sum_{k=-\infty}^{\infty}\left|i_{j,k}^{A}\right|^2+\sum_{j=J}^{\infty}\sum_{k=-\infty}^{\infty}\left|i_{j,k}^{D}\right|^2}\to\max. \end{cases} \tag{8}$$

Выбор вейвлета будет оптимальным, если (8) среднеквадратическое отклонение восстановленного (полученного в результате обратного вейвлет преобразования) сигнала будет иметь минимальное среднеквадратическое отклонение, а энергия спектра локальной гармонической группы будет иметь максимум в выбранном частотном диапазоне. Дополнительно вейвлет преобразование позволит производить фильтрацию полезного сигнала от искажений, которые могут вносить средства измерений [5].

Разработанный в настоящей работе рекурсивный алгоритм расчета переходных процессов в электрических сетях на основе вейвлет коэффициентов представлен на рисунке 2.

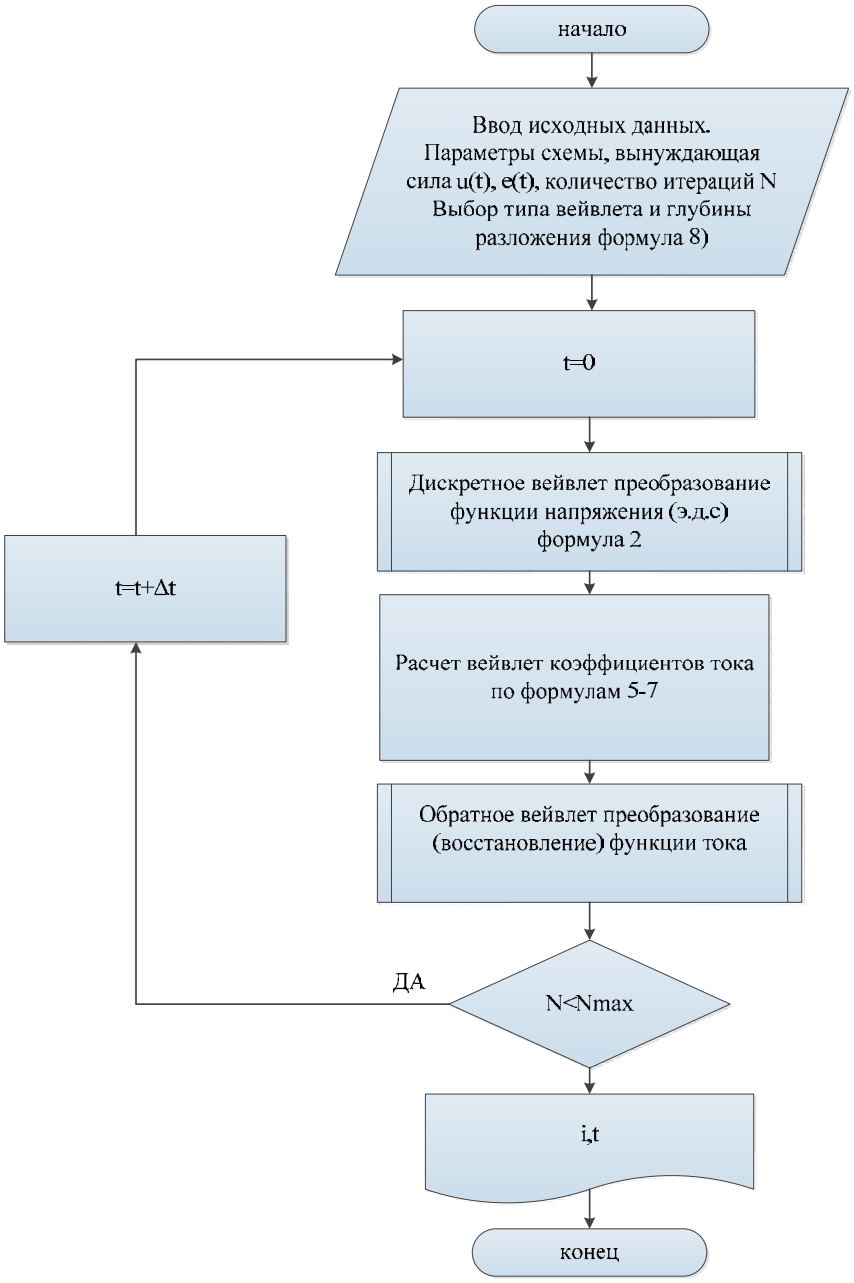


Рисунок 2. Разработанный алгоритм

Численный эксперимент проведем для схемы замещения (рис. 1), заданной следующими параметрами: $U_ф$=115/1,73 кВ; $R_т$=4,4 Ом; $X_т$=87 Ом; $R_л$=13 Ом; $X_л$=21 Ом; Rн=1102 Ом; Хн=827 Ом. Для численного эксперимента был выбран интервал времени *Δt=0,02 мс=0,0002 с.*

На первом шаге работы алгоритма (рисунок 3) расчетный ток короткого замыкания полностью повторяет вынуждающую силу (функцию напряжения).

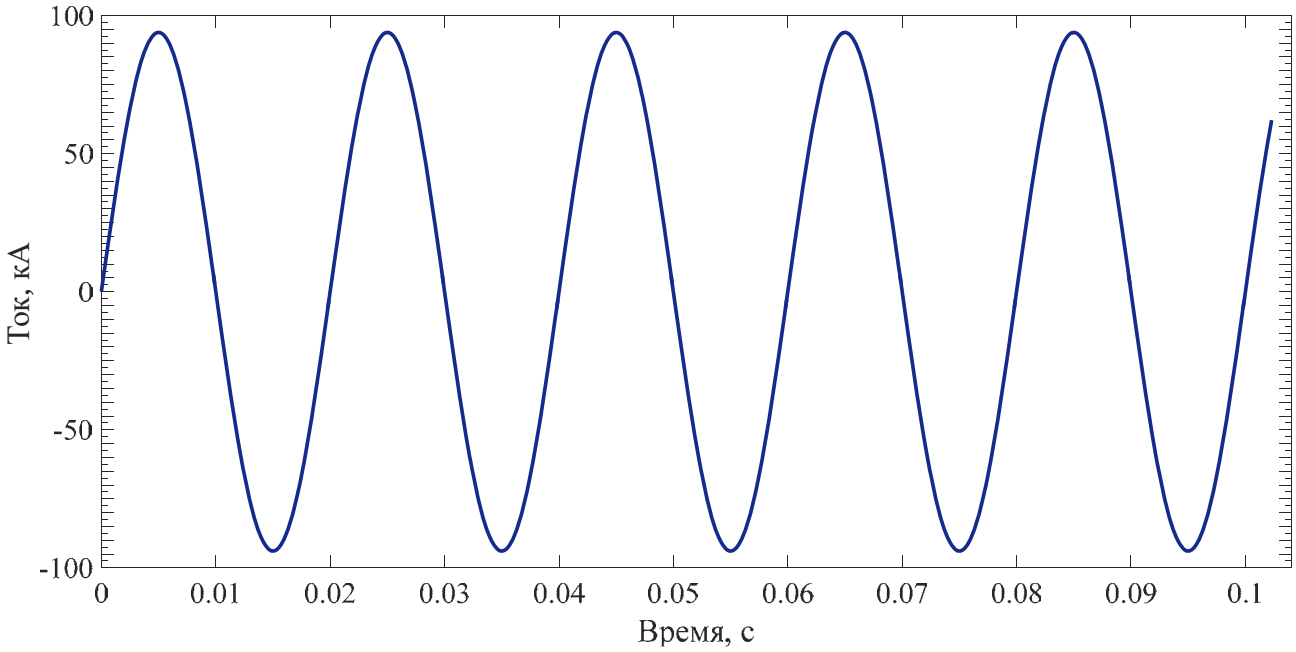


Рисунок 3. Ток после первой итерации

Для последующих итераций производится последовательное приближение расчетной функции тока. Так, на рисунке 4, представлена осциллограмма тока замыкания после 400 итераций.

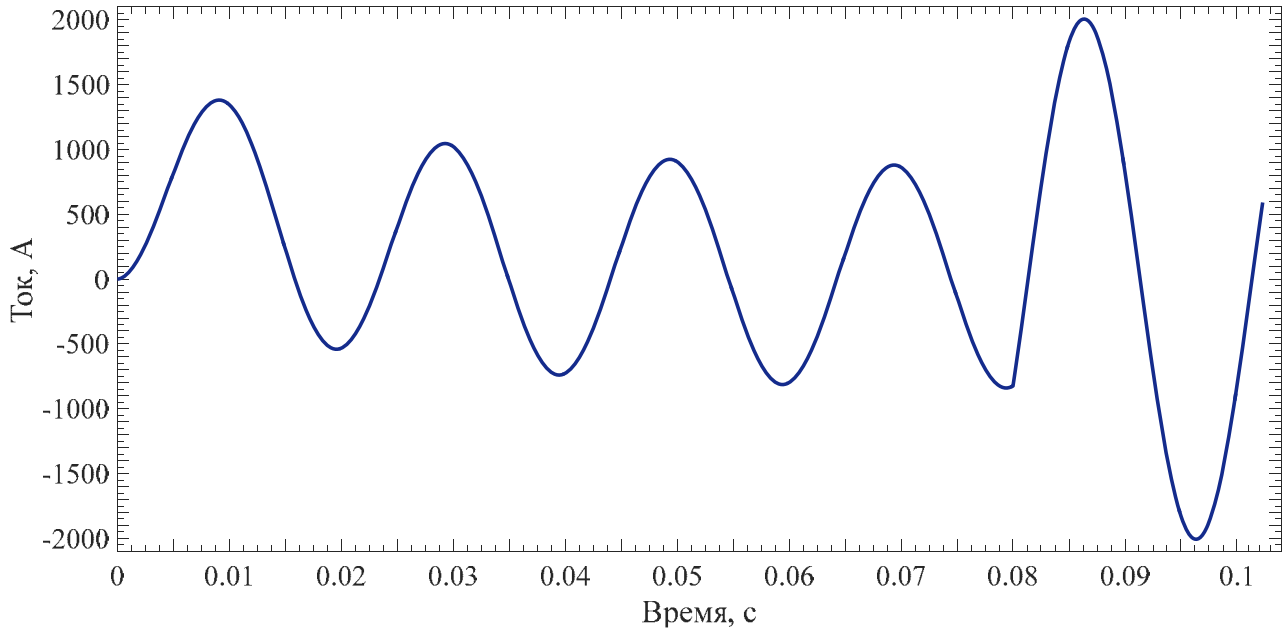


Рисунок 4. Ток после 400 итераций

На рисунке 4 уже отчетливо можно наблюдать возникающий в первые полпериода промышленной частоты подъем ударного тока короткого замыкания. Осциллограмма тока короткого замыкания фазы А после окончания работы алгоритма (600 циклов) представлена на рисунке 5.

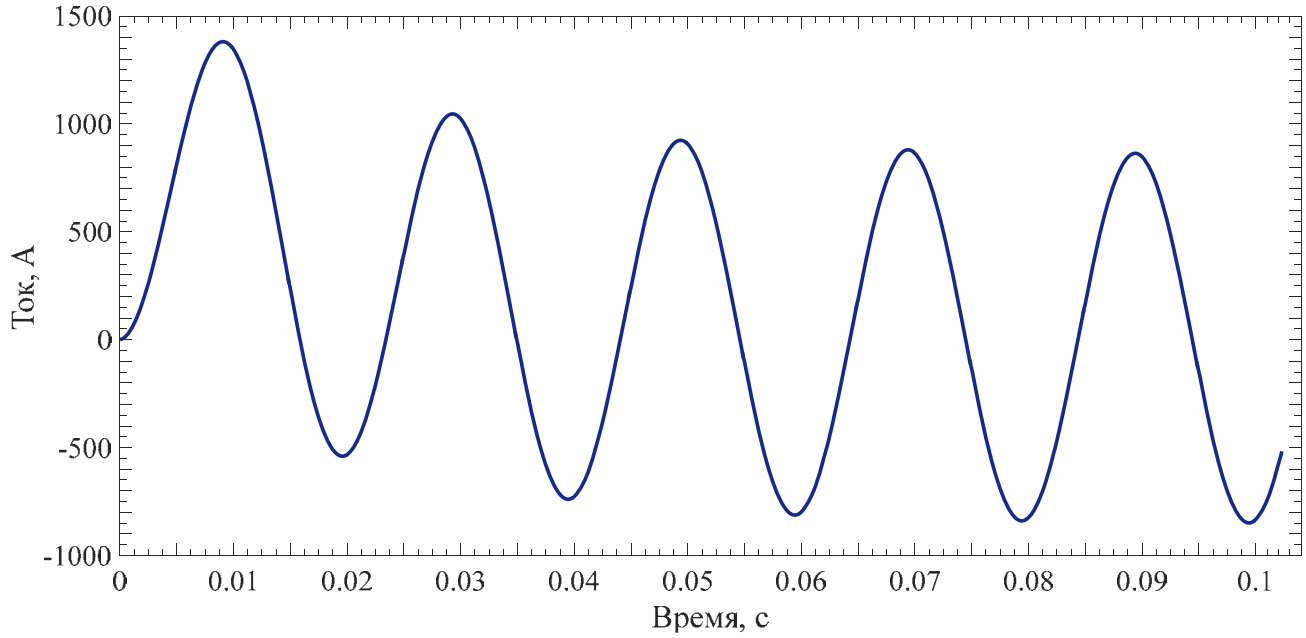


Рисунок 5. Окончание цикла

Сравнение результатов расчета тока короткого замыкания по предложенному алгоритму с аналитическим решением показало (рисунок 6), что абсолютная погрешность не превысила 42 А, относительная погрешность менее 3%.

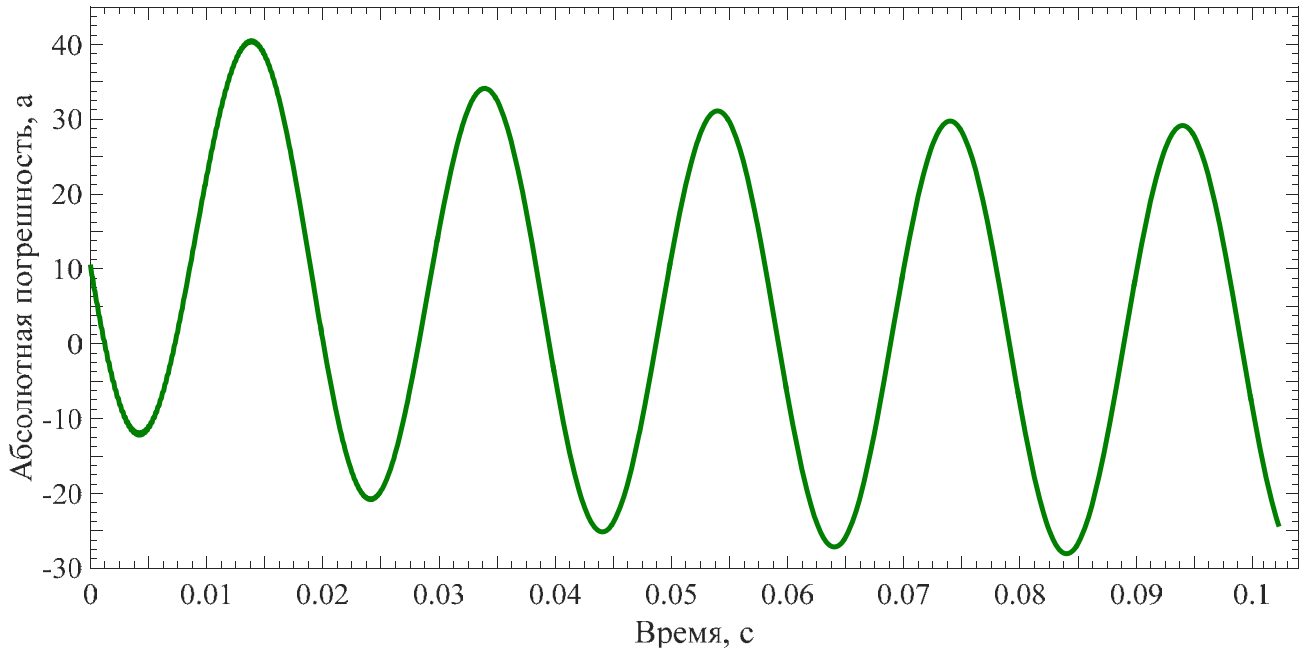


Рисунок 6. Абсолютная погрешность вычисления тока КЗ по предложенному алгоритму

Среднеквадратическое отклонение σ составило 0,031 А. В целом, при проведении численных экспериментов по условию (8) были исследованы вейвлеты Хаара, вейвлеты семейства Добеши, вейвлет Майера, Койфлет, Симлет и др. Следует отметить, что минимальное среднеквадратичное отклонение исходного и восстановленного сигнала было достигнуто при использовании вейвлетов Добеши 4 и 10 порядков db4, db10. Коэффициент сжатия при этом достигал величины 16.

При этом в качестве информации о вынуждающей силе (напряжения на шинах подстанции) в разработанном алгоритме применяются вейвлет коэффициенты.

Выводы

1. Критерий оптимального выбора вейвлет функции базируется на условии максимума локального спектра энергии, сосредоточенного в исследуемом частотном диапазоне. Оптимальный результат по величине среднеквадратичного отклонения сигнала в результате обратного вейвлет преобразования показали вейвлеты Добеши 4 и 10 порядков.

2. Разработанный алгоритм является итерационным. Для цепей синусоидального тока промышленной частоты f=50 Гц при интервале времени 0,02 мс, итерационный процесс сходится после 600 циклов.

3. Относительная погрешность определения ударного тока трехфазного короткого замыкания в соответствии с разработанным алгоритмом, не превысила значение 3%.

Таким образом, проведенные исследования показали, что расчет переходных процессов в электрических сетях может быть осуществлен по рекурсивному алгоритму, при этом вынуждающая сила (напряжение) задается посредством детализирующих и аппроксимирующих вейвлет коэффициентов. Разработанная методика может быть применена для цифровой обработки данных о параметрах режимов электрических сетей и систем электроснабжения в рамках развития технологии «цифровая подстанция».

Список литературы

1. Манусов, В. З. Применение теории вейвлетов для анализа данных при решении задачи прогнозирования электрической нагрузки / В. З. Манусов, К. Н. Бойко. – Текст : непосредственный // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 4. – С. 212–215.

2. Мисриханов, А. М. Применение методов вейвлет преобразования в электроэнергетике / А.М. Мисриханов. – Текст : непосредственный // Автоматика и телемеханика. – 2006. – № 5. – С. 5–23.

3. Czarnecki, L. S. Power properties of four-wire systems at nonsinusoidal supply voltage / L. S. Czarnecki, P. M. Haley. – DOI: 10.1109/tpwrd.2015.2463253 // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2016. – Vol. 31, Iss. 2. – P. 513–521.

4. Осипов, Д. С. Разработка критерия выбора оптимального типа материнского вейвлета в задаче расчета активной и реактивной мощности систем электроснабжения / Д. С. Осипов. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2018. – № 6 (162). – С. 71–75.

5. Hamid, E. Y. Wavelet-based data compression of power system disturbances using the minimum description length criterion / E. Y. Hamid, Z.-I. Kawasaki. – DOI: 10.1109/61.997918 // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2002. – Vol. 17, Iss. 2. – P. 460–466.

6. Guo, M.-F. Wavelet-transform based early detection method for short-circuit faults in power distribution networks / M.-F. Guo, N.-C. Yang, L.-X. You. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.01.013 // International journal of electric power and energy systems. – 2018. – Vol. 99. – P. 706–721.

7. High impedance fault detection in power distribution systems using wavelet transform and evolving neural network / S. Silva, M. Gouvera, A. Lacerda [et al.]. – DOI: 10.1016/j.epsr.2017.08.039 // Electric power systems research. – 2018. – Vol. 154. – P. 474–483.

8. Dwivedi, U. D. A Wavelet-based denoising technique for improved monitoring and characterization of power quality disturbances / U. D. Dwivedi, S. N. Singh. – DOI: 10.1080/15325000902762281 // Electric Power Components and Systems. – 2009. – Vol.37, №.7. – P. 753–769.

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 г. Выпуск 1 (64). С. 67–76

УДК 621.31
DOI: 10.18822/byusu20220167-76

РАЗРАБОТКА МЕТОДА АНАЛИЗА И ПРОГНОЗА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ МИКРОГРИД КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Ковалев Владимир Захарович
доктор технических наук,
профессор Института нефти и газа
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: vz_kovalev@mail.ru

Щербаков Александр Геннадьевич
кандидат технических наук, доцент,
декан факультета очного обучения АНОО ВО
«Сибирский институт бизнеса и информационных технологий»
Омск, Россия
E-mail: scherbacov@yandex.ru

Хамитов Рустам Нуриманович
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры электрической техники
ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»
Омск, Россия
E-mail: apple_27@list.ru

Статья посвящена построению алгоритма прогнозирования и оценки качества электрической энергии MicroGrid Крайнего Севера. Приводится фрагмент суточного графика электрической нагрузки малого поселения Крайнего Севера. Показаны системные особенности преобразования электрической энергии в изолированных системах электроснабжения. Построена структурная модель системы электроснабжения MicroGrid Крайнего Севера. Проведен вычислительный эксперимент по оценке качества электрической энергии MicroGrid Крайнего Севера. Определена потенциальная область выхода показателей качества электрической энергии за рамки, допустимые по ГОСТ 32144 – 2013.

Ключевые слова: системный анализ, качество электрической энергии, MicroGrid, Крайний Север.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ANALYSIS AND FORECAST OF THE QUALITY OF ELECTRIC POWER MICROGRID IN THE FAR NORTH

Vladimir Z. Kovalev
Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Institute of Oil and Gas,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: vz_kovalev@mail.ru

Alexander G. Shcherbakov
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Head for the Faculty of Full-time Education,
Siberian Institute of Business and Information Technologies,
Omsk, Russia
E-mail: scherbacov@yandex.ru

Rustam N. Khamitov
Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor,
Professor for the Department of Electrical Engineering,
Omsk State Technical University,
Omsk, Russia
E-mail: apple_27@list.ru

The article is devoted to the construction of an algorithm for predicting and evaluating the quality of MicroGrid electric power in the Far North. A fragment of the daily schedule of the electrical load of a small settlement in the Far North is given. The system features of electrical energy conversion in isolated power supply systems are shown. A structural model of the MicroGrid power supply system of the Far North has been built. A computational experiment was carried out to assess the quality of electrical energy MicroGrid in the Far North. The potential area for the output of electric energy quality indicators beyond the permissible limits according to GOST 32144 – 2013 is determined.

Keywords: system analysis, power quality, MicroGrid, Far North.

Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) при решении задач электроснабжения удаленных поселений децентрализованной зоны энергоснабжения приобрело общемировую тенденцию [1-5]. Расширение присутствия в мировой экономике возобновляемой энергетики (ВЭ) закономерно приводит к появлению эффектов взаимного влияния собственно характеристик элементов ВЭ и характеристик внешней, по отношению к ВЭ, среды [6-7]. Например, в работе [8], направленной на проектирование и оптимальное управление энергопотреблением MicroGrid с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), анализируется «сообщество MicroGrid с внутренним рынком». Здесь же показано наличие социальных, экологических и экономических предпосылок для «обмена энергией» и «обмена услугами» между «объектами», входящими в MicroGrid. Учет в системе управления «неэнергетических» взаимодействий («услуг») позволил добиться снижения показателя LCOE до 40 % и повысить качество электроснабжения [8]. В работах [9-11] показано, что детальный анализ взаимодействия и взаимовлияния отдельных ВИЭ необходимо осуществлять на базе системного анализа [9-11] в рамках понятийного аппарата микрогрид (MicroGrid) [12].

Далее, в соответствии с работами [9, 12], под MicroGrid будем понимать множество «изолированных систем электроснабжения (ИСЭ), отвечающее условию: каждая ИСЭ содержит в себе электротехнический комплекс генерирования электрической энергии, включая ВИЭ; все ИСЭ электрически между собой не связаны; все ИСЭ взаимозависят через неэнергетические взаимодействия (НЭ): информационные, коммуникативные, логистические и другие; все ИСЭ имеют общую конечную цель; каждая ИСЭ имеет собственную цель, обусловленную свойствами потребителя ее электрической энергии (ПЭ)» [9]. Конечная цель определена особенностями, условиями и задачами существования внешней системы/надсистемы и содержит в себе энергетические, социальные, экологические, экономические и другие показатели, характеризующие потенциальные возможности и эффективность функционирования

MicroGrid [13-16]. Развитие ВЭ в направлении формирования взаимовлияющих и взаимодействующих региональных обособленных электротехнических комплексов генерирования электрической энергии (РОЭТК), в смысле определений работ [9,17], требует обновления применяемых инструментов решения задач, возникающих при анализе потенциальных возможностей, при построении систем управления в режиме реального времени и выборе архитектуры MicroGrid, составляющих РОЭТК [18-22].

Использование в современных комплексах производства-потребления электрической энергии, применяемых в MicroGrid, таких компонент, как накопители энергии, полупроводниковые преобразователи энергии и интеллектуальные системы управления, усугубляет вопросы анализа и управления качеством электрической энергии [23-25]. Дополнительные предпосылки, способствующие искажению качества энергии в ИСЭ, возникают из-за сравнимости мощностей источника энергии и отдельных потребителей электрической энергии, при стохастическом характере электропотребления и неопределенностях графика выработки электрической энергии, свойственных ВИЭ [26-29].

Рассмотрим характерный фрагмент суточного графика нагрузки для MicroGrid малого поселения (МП) Крайнего Севера, приведенный на рисунке 1. Длительность представленного фрагмента – 60 минут, частота измерения – 1 минута, время измерения – с 06 часов 42 минут 05 августа 2019 года. Количество жителей МП – 34 человека. Мгновенные значения фазных мощностей в точках максимальной (Max) или минимальной (Min) мощности на интервале рассмотрения представлены в таблице.

Данный фрагмент хорошо иллюстрирует особенности электропотребления, свойственные МП Крайнего Севера: фазная несимметрия потребляемой мощности, ее стохастический характер распределения во времени по амплитуде и по фазам, наличие «крутых» фронтов наброса – сброса нагрузки, с градиентами более 2100 Вт/мин. (например, на интервале 9-10 минуты фазы А). Такая ситуация обусловлена стохастическим характером подключения/отключения нагрузки МП, которая сопоставима по мощности с источником энергии.

Таблица – Мгновенные значения фазных мощностей в характерных временных точках

	Мгновенные значения фазных мощностей в характерных временных точках за период времени с 6:42 до 7:41 05 августа 2019 г.				
Момент времени измерения, мин.	t=12	t=21	t=22	t=28	t=50
Мощность фазы А, Вт	Max:2708	512	Min:415	568	761
Мощность фазы В, Вт	Max:3321	401	306	Min:159	405
Мощность фазы С, Вт	2252	Max:4084	3952	1551	Min:1418

Выявленные системные особенности преобразования электрической энергии в MicroGrid Крайнего Севера требуют построения структурной модели типовой MicroGrid Крайнего Севера с применением ВИЭ и ее математической модели, компоненты которой адекватно отражают протекающие физические процессы в элементах MicroGrid и отвечают базовым принципам системного анализа применительно к MicroGrid [9].

Структурная модель типовой MicroGrid Крайнего Севера с применением ВИЭ представлена на рис. 2. В ее состав входят:

– П0 – подсистема «Гибридная электрическая станция» (ГиЭС), включающая в себя солнечную электростанцию (СЭС), дизель-генераторную установку (ДГУ) и накопитель энергии (НЭ). Управление потоками энергии между СЭС, ДГУ и НЭ, внутри подсистемы П0, осуществляется с помощью коммутатора К. Питание нагрузки от гибридной электрической станции энергии производится через преобразователь частоты со звеном постоянного тока;

– $П_1$-$П_n$ – подсистемы потребителей электрической энергии, подключаемых к точке общего присоединения (ТОП).

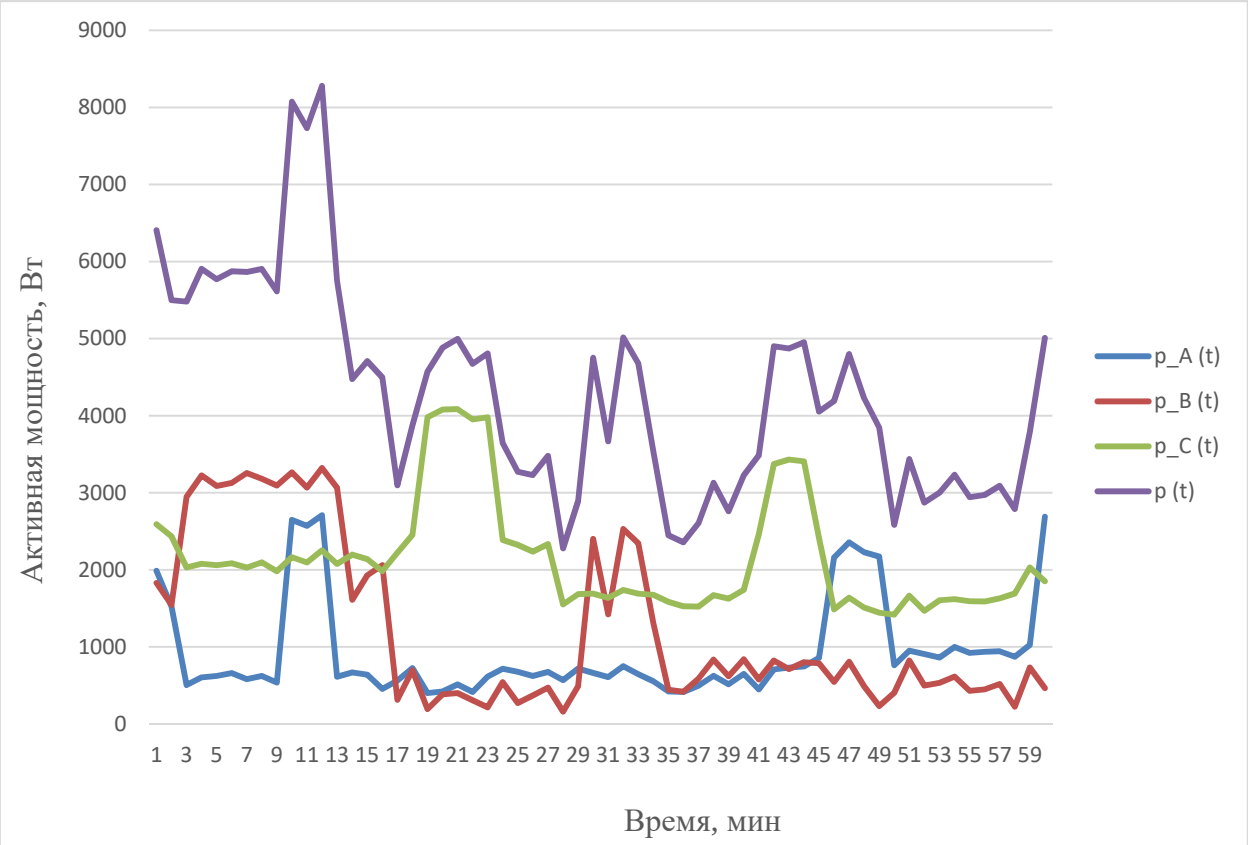


Рисунок 1. Фрагмент суточного графика MicroGrid от 05 августа 2019 г. за период времени с 6:42 до 7:41. Здесь p_A (t) – изменение активной мощности фазы A, Вт; p_B (t) – изменение активной мощности фазы B, Вт; p_C (t) – изменение активной мощности фазы C, Вт

– $П_И$ – информационная подсистема, формирующая вектор управляющих сигналов $\dot{Y}(t)$:

$$\dot{Y}(t) = \{y_1(t), y_2(t), \dots, y_L(t)\}$$

в зависимости от состояния вектора сигналов обратной связи $\dot{Y}_{ОС}(t)$:

$$\dot{Y}_{ОС}(t) = \{u^A(t), u^B(t), u^C(t), i_1^A(t), i_1^B(t), i_1^C(t), \dots, i_n^A(t), i_n^B(t), i_n^C(t)\},$$

в зависимости от состояния вектора задающих воздействий надсистемы $\dot{Y}_{31}(t)$:

$$\dot{Y}_{31}(t) = \left\{y_1^{31}(t), y_2^{31}(t), \dots, y_F^{31}(t)\right\},$$

вектора задающих воздействий подсистемы ИСЭ $\dot{Y}_{32}(t)$:

$$\dot{Y}_{32}(t) = \left\{y_1^{32}(t), y_2^{32}(t), \dots, y_G^{32}(t), \dots\right\},$$

векторов задающих воздействий, формируемых подсистемами $П_1$ – $П_n$.

Отметим, что вектор $\dot{Y}_{32}(t)$ включает в себя цели подсистем $П_1$ – $П_n$ и внешние неэнергетические воздействия.

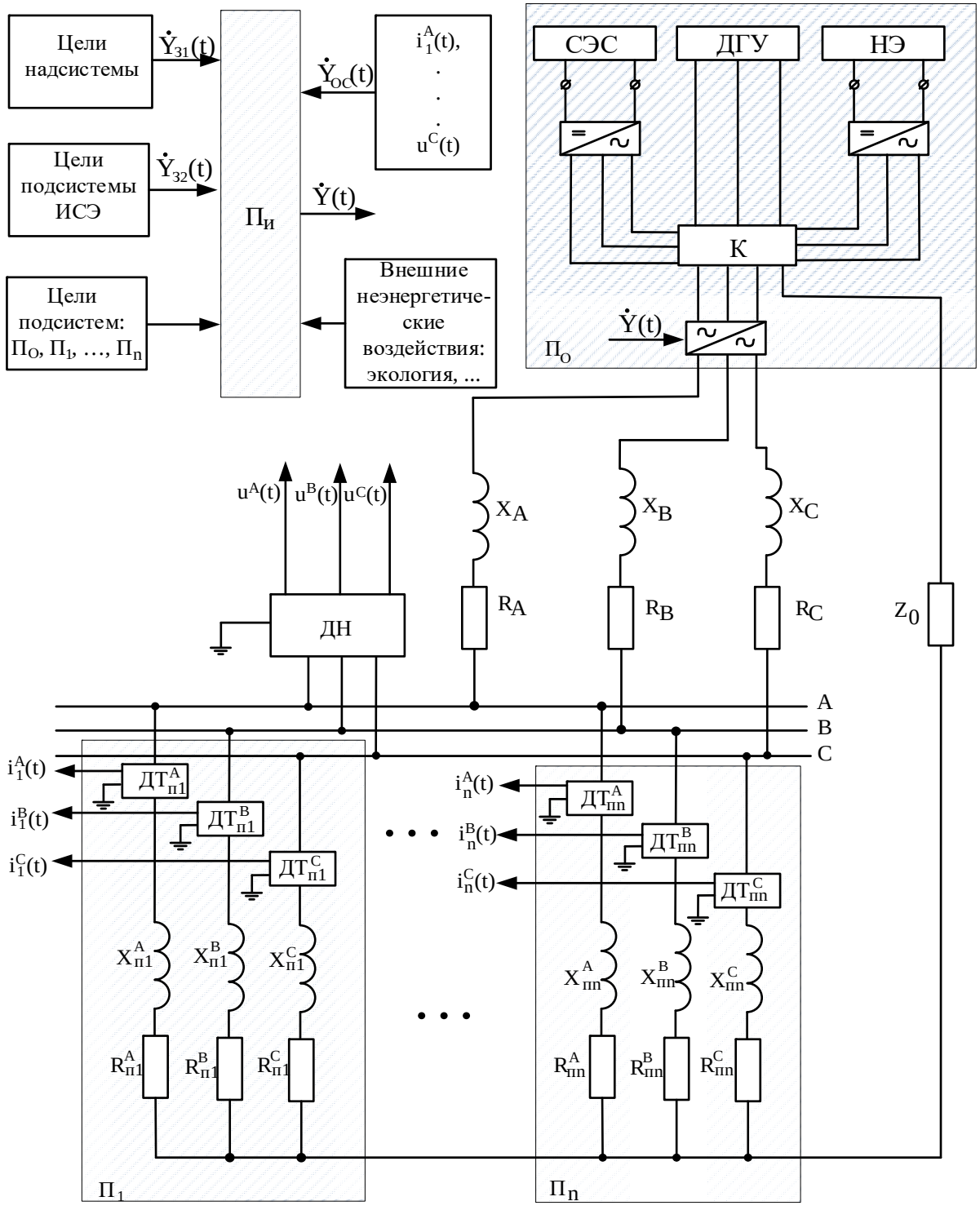


Рисунок 2. Типовая структурная модель MicroGrid Крайнего Севера: $П_0$ – подсистема «Гибридная электрическая станция»; $П_1$-$П_n$ – подсистемы потребителей электрической энергии; $П_и$ – информационная подсистема; СЭС – солнечная электрическая станция; ДГУ – дизель-генераторная установка; НЭ – накопитель энергии, в общем случае – гибридный; К – коммутатор; ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока

Гибридная электрическая станция, как правило, вырабатывает переменную трёхфазную ЭДС, форма которой отличается от синусоидальной, которая требуется согласно действующему законодательству на качество электрической энергии. Поэтому для глубокого анализа процессов преобразования энергии в системах с гибридными электрическими станциями ЭДС, вырабатываемую каждой фазой системы, следует представлять в виде гармонического ряда с

ограниченным набором гармоник. В рамках данной работы процессы преобразования энергии в гибридной системе электроснабжения рассматриваются от воздействия основной гармоники каждой фазы системы, имеющей частоту $\omega_{(1)}$. Таким образом, закон изменения ЭДС, вырабатываемой каждой фазой системы электроснабжения, может быть записан следующим образом:

$$\begin{cases} e_{L1(1)}(t) = \sqrt{2}E_{L1(1)} \cdot sin\left(\omega_{(1)}t + \varphi_{L1(1)}\right) \\ e_{L2(1)}(t) = \sqrt{2}E_{L2(1)} \cdot sin\left(\omega_{(1)}t + \varphi_{L2(1)} - \frac{2}{3}\pi\right). \\ e_{L3(1)}(t) = \sqrt{2}E_{L3(1)} \cdot sin\left(\omega_{(1)}t + \varphi_{L3(1)} + \frac{2}{3}\pi\right) \end{cases} \quad (1)$$

В последней системе:

$E_{L1(1)}$, $E_{L2(1)}$ и $E_{L3(1)}$ – действующие значения основной гармоники ЭДС в соседних фазах. Предполагая, что рассматриваемая в данной работе система электроснабжения является симметричной, вводим следующее допущение $E_{L1(1)} = E_{L2(1)}$=$E_{L3(1)} = E$;

$\varphi_{L1(1)}$, $\varphi_{L2(1)}$ и $\varphi_{L3(1)}$ – начальные фазы основной гармоники ЭДС в соседних фазах. В случае если система электроснабжения в рамках данной работы рассматривается как симметричная, предполагаем, что $\varphi_{L1(1)} = \varphi_{L2(1)} = \varphi_{L3(1)} = 0$.

Учитывая вышеизложенные допущения для системы уравнений (1) и применяя символический метод расчёта цепей переменного тока, преобразуем систему уравнений (1) к виду:

$$\begin{cases} \dot{E}_{L1} = A\{e_{L1(1)}(t)\} = E \cdot e^{j0} \\ \dot{E}_{L2} = A\{e_{L2(1)}(t)\} = E \cdot e^{-j\frac{2}{3}\pi} \\ \dot{E}_{L3} = A\{e_{L3(1)}(t)\} = E \cdot e^{j\frac{2}{3}\pi} \end{cases} \quad (2)$$

В системе уравнений (2) А – оператор преобразования функций законов изменения ЭДС $e_{L1(1)}(t)$ $e_{L2(1)}(t)$ и $e_{L3(1)}(t)$ к их представлению на комплексной плоскости.

Потери энергии в подсистеме Π_0 моделируются сопротивлениями Z_{L1}, Z_{L2}, Z_{L3} и Z_N. Отметим, что идентификация параметров Z_{L1}, Z_{L2}, Z_{L3} и Z_N представляет собой отдельную задачу [18] и не рассматривается в настоящей работе. Соответственно имеем:

$$\begin{cases} Z_{L1} = R_A + j\left(\omega_{(1)}L_{L1}\right) \\ Z_{L2} = R_B + j\left(\omega_{(1)}L_{L2}\right) \\ Z_{L3} = R_C + j\left(\omega_{(1)}L_{L3}\right) \\ Z_N = Z_0\left(R_0, (\omega L_0), (\omega C_0)\right) \end{cases} . \quad (3)$$

Тогда при условии линейности характеристик Π_1 до включительно Π_n имеем выражения:

$$\begin{cases} \dot{Z}_k^{L1} = Z_k^{L1} \cdot e^{j\varphi_k^{L1}} \\ \dot{Z}_k^{L2} = Z_k^{L2} \cdot e^{j\varphi_k^{L2}} \\ \dot{Z}_k^{L3} = Z_k^{L3} \cdot e^{j\varphi_k^{L3}} \\ k = 1, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

В последней системе уравнений:

$$\begin{cases} Z_k^{L1} = \sqrt{(R_k^{L1})^2 + \left(\omega_{(1)} L_k^{L1}\right)^2} \\ Z_k^{L2} = \sqrt{(R_k^{L2})^2 + \left(\omega_{(1)} L_k^{L2}\right)^2} \\ Z_k^{L3} = \sqrt{(R_k^{L3})^2 + \left(\omega_{(1)} L_k^{L3}\right)^2} \\ \varphi_k^{L1} = arctan\left(\frac{\omega_{(1)} L_k^{L1}}{R_k^{L1}}\right) \\ \varphi_k^{L2} = arctan\left(\frac{\omega_{(1)} L_k^{L2}}{R_k^{L2}}\right) \\ \varphi_k^{L3} = arctan\left(\frac{\omega_{(1)} L_k^{L3}}{R_k^{L3}}\right) \\ k = 1, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

Дальнейшие преобразования позволяют перейти к решению частной задачи прогнозирования и оценки качества электрической энергии изолированной системы электроснабжения малых поселений. А именно, к построению методики прогнозирования и оценки долевого вклада каждого из потребителей электрической энергии в изменение фазных напряжений, при нелинейном характере минимум одного из потребителей электрической энергии в точке общего присоединения.

Пусть $\Delta\dot{U}_k^{\mathrm{A}}$, $\Delta\dot{U}_k^{B}$, $\Delta\dot{U}_k^{C}$, *k=1*, …, *n* «доли соответствующего потребителя», показывающие их вклад в отклонение значения напряжения в контролируемой точке, тогда в рамках принятых выше допущений можно показать, что:

$$\begin{cases} \Delta\dot{U}_k^{\mathrm{A}} = \frac{\dot{U}_{\Pi}^{A}}{Z_k^{A}} Z_A \\ \Delta\dot{U}_k^{B} = \frac{\dot{U}_{\Pi}^{B}}{Z_k^{B}} Z_B, \\ \Delta\dot{U}_k^{C} = \frac{\dot{U}_{\Pi}^{C}}{Z_k^{C}} Z_C \\ k = 1, \dots, n \end{cases} \quad (6)$$

где $\dot{U}_{\Pi}^{A}, \dot{U}_{\Pi}^{B}, \dot{U}_{\Pi}^{C}$ – значения фазных напряжений в точке общего присоединения потребителей согласно рис. 2.

Тестирование предложенной методики было проведено на следующей задаче. Количество потребителей – два. Первый потребитель ($П_1$) имеет параметры, соответствующие точке 1 на рис. 1 (нелинейный, несимметричный). Параметры $П_1$ приняты неизменными в ходе вычислительного эксперимента. Второй потребитель ($П_2$) – линейный, симметричный, с номинальной мощностью 5,5 кВт и номинальным коэффициентом мощности 0,81. Исследовалась работа системы при изменении потребляемой мощности $П_2$ в диапазоне от холостого хода до 1,1 номинальной, при неизменном значении коэффициента мощности $П_2$. В ходе эксперимента установлено (рис. 3), что при мощности потребления $П_2$, превышающей 0,3 номинальной, напряжение фазы С становится ниже допустимого по ГОСТ 32144 – 2013 [30].

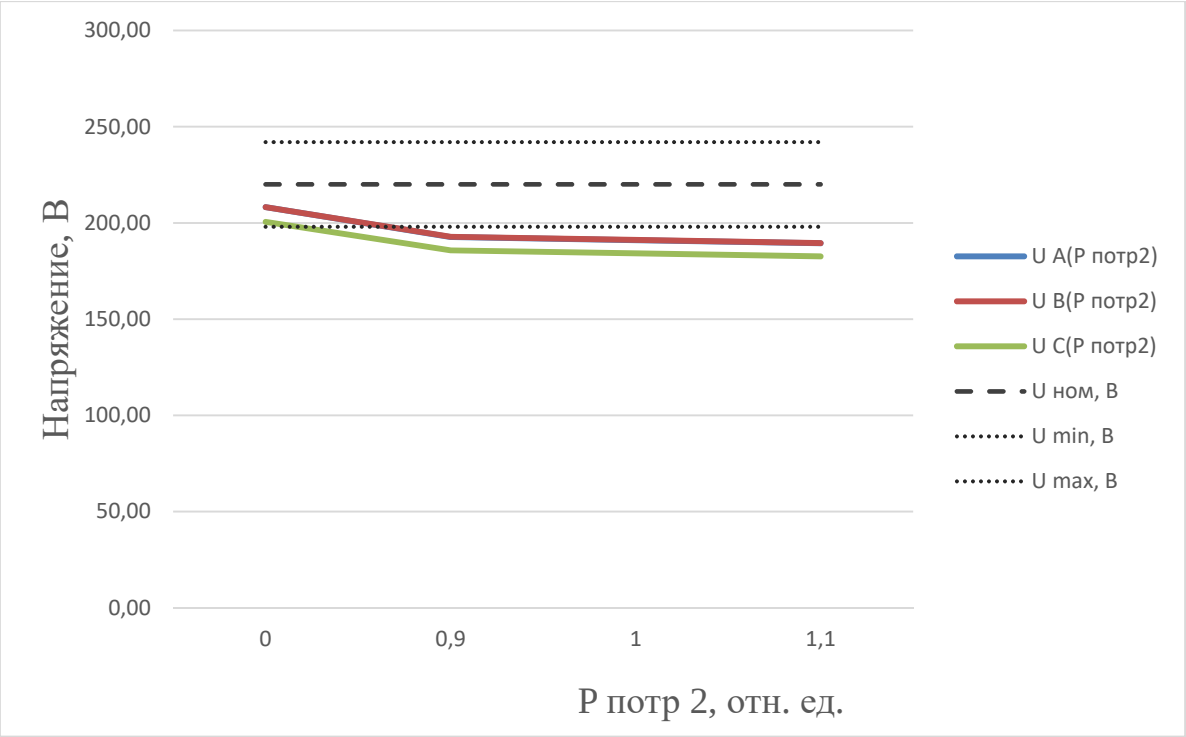


Рисунок 3. Изменение действующего значения напряжения
в точке общего присоединения $П_1$ и $П_2$ в соответствии с рис. 1

Выводы

1. Детализировано понятие MicroGrid применительно к целям и задачам настоящей работы.
2. Показаны системные особенности электропотребления в MicroGrid Крайнего Севера.
3. Предложена структурно-функциональная модель MicroGrid Крайнего Севера.
4. Предложена методика построения математической модели MicroGrid Крайнего Севера.
5. Разработан алгоритм прогнозирования и оценки качества электрической энергии MicroGrid Крайнего Севера.
6. Проведено тестирование разработанного алгоритма прогнозирования и оценки качества электрической энергии MicroGrid Крайнего Севера. Показано наличие возможности выхода показателей качества электрической энергии за рамки допустимого по ГОСТ 32144 – 2013.

Благодарим Школу научного лидерства Центра развития компетенций Западно-Сибирского НОЦ за поддержку и сопровождение в подготовке этой статьи.

Список литературы

1. Siamanta, Z.C. Conceptualizing alternatives to contemporary renewable energy development: Community Renewable Energy Ecologies (CREE) / Z. C. Siamanta //Journal of Political Ecology.– 2021. – Vol. 28, № 1. – P. 47–69.
2. Wang, J. The relationship of renewable energy consumption to financial development and economic growth in China / J. Wang, S. Zhang, Q. Zhang // Renewable Energy. – 2021. – Vol. 170. – P. 897–904.
3. Ansari, M. A. Do renewable energy and globalization enhance ecological footprint: an analysis of top renewable energy countries? / M. A. Ansari, S. Haider, T. Masood // Environmental Science and Pollution Research. – 2021. – Vol. 28, № 6. – P. 6719–6732.

4. Multifactorial components analysis of the renewable energy sector in the oecd countries and managerial implications / A. M. Androniceanu, I. Georgescu, C. Dobrin, I. V. Dragulanescu // Polish Journal of Management Studies. – 2020. Vol. 22, № 2. – P. 36–49.

5. Ali, A. Natural Resources Depletion, Renewable Energy Consumption and Environmental Degradation: A Comparative Analysis of Developed and Developing World / A. Ali, M. Audi, Y. Rousel // International Journal of Energy Economics and Policy. – 2021. – Vol. 11, № 3. – P. 251–260.

6. Alola, A. A. Renewable energy consumption in Coastline Mediterranean Countries: impact of environmental degradation and housing policy / A. A. Alola, U. V. Alola, S. S. Akadiri // Environmental Science and Pollution Research. – 2019. – Vol. 26, № 25. – P. 25789–25801.

7. Oanh, T. T. K. Renewable Energy, Foreign Direct Investment, Economic Growth, and Environmental Degradation in Asian Countries / T. T. K.Oanh, N. T. Quoc, P. T. N. Dieu // International Journal of Energy, Environment and Economics. – 2021. – Vol. 28, № 2. – P. 87–102.

8. Design and optimal energy management of community microgrids with flexible renewable energy sources / N. Tomin, V. Shakirov, A. Kozlov [et al.] // Renewable Energy. – 2022. – Vol. 183. – P. 903–921.

9. Архипова, О. В. Принципы и средства исследования регионально обособленного электротехнического комплекса с позиций системного анализа / О. В. Архипова. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2020. – № 3 (171). – С. 42–46.

10. Воропай, Н. И. Теория систем для электроэнергетиков / Н. И. Воропай. – Новосибирск : Наука, 2000. – 273 с. – ISBN 5-02-031274-6. – Текст : непосредственный.

11. Папков, Б. В. Теория систем и системный анализ для электроэнергетиков / Б. В. Папков, А. Л. Куликов. – 2-е издание, исправленное и дополненное. – Москва : Юрайт, 2019. – 470 с. – Текст : непосредственный.

12. Павлюк, Г. П. Формулировка комплексной оптимизационной задачи построения микрогрид арктического анклава в мультиагентном представлении / Г. П. Павлюк, А. К. Абд-Эльрахим, В. А. Шихин. – Текст : непосредственный // Российская Арктика. – 2020. – № 8. – С. 52–64.

13. Economy-environment-energy performance evaluation of CCHP microgrid system: A hybrid multi-criteria decision-making method / H. Zhao, B. Li, X. Wang [et al.] // Energy. – 2022. – Vol. 240. – P. 122830.

14. Assessment of Microgrid Potential in Southeast Asia Based on the Application of Geospatial and Microgrid Simulation and Planning Tools / P. Bertheau, M. M. Hoffmann, A. Eras-Almeida, P. Blechinger // Green Energy and Technology. – 2020. – P. 149–178.

15. Microgrid Systems: Towards a Technical Performance Assessment Frame / S. Marchand, J. Ungerland, C. Monsalve [et al.] // Energies. – 2021. – Vol. 14, № 8. – P. 2161.

16. Multi-energy microgrid optimal operation with integrated power to gas technology considering uncertainties / A. Mobasseri, A. A. Ghadimi, M. Tostado-Véliz [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 333. – P. 130174.

17. Архипова, О. В. Методика моделирования регионально обособленного электротехнического комплекса / О. В. Архипова, В. З. Ковалев, Р. Н. Хамитов. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 1. – С. 173–180.

18. Hemmati, R. Resilience-oriented adaptable microgrid formation in integrated electricity-gas system with deployment of multiple energy hubs / R. Hemmati, H. Mehrjerdi, S. M. Nosratabadi // Sustainable Cities and Society. – 2021. – Vol. 71. – P. 102946.

19. Hierarchical energy optimization management of active distribution network with multi-microgrid system / S. Wenzhi, H. Zhang, L. Xinyang [et al.] // Journal of Industrial and Production Engineering. – 2021.

20. Multi-microgrid Energy Management Systems: Architecture, Communication, and Scheduling Strategies / B. Zhou, J. Zou, D. Xu [et al.] // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. – 2021. – Vol. 9, № 3. – P. 463–476.

21. An Economical Energy Management Strategy for Viable Microgrid Modes / S. Abid, N. Javaid, T. A. Alghamdi [et al.] // Electronics (Switzerland). – 2019. – Vol. 8, № 12. – P. 1442.

22. An expected-cost realization-probability optimization approach for the dynamic energy management of microgrid / J. Zhu, Y. Zhuo, J. Chen [et al.] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2022. – Vol. 136. – P. 107620.

23. Наумов, А. А. Обеспечение требуемого качества электрической энергии / А. А. Наумов. – DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 85–92.

24. Rani, M. D. Power quality assessment in grid connected mode hybrid microgrid with various loads / M. D. Rani, M. V. G. Rao, P. S. Prakash // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2021. – Vol. 99, № 18. – P. 4241–4252.

25. Review of model predictive control for power system with large-scale wind power grid-connected / L. Ye, P. Lu, Y. Zhao [et al.] // Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao. – 2021. – Vol. 41, № 18. – P. 6189–6197.

26. Elkholy, A Harmonics assessment and mathematical modeling of power quality parameters for low voltage grid connected photovoltaic systems / A. Elkholy // Solar Energy. – 2019. – Vol. 183. – P. 315–326.

27. A novel unbalanced power flow analysis in active AC-DC distribution networks considering PWM convertors and distributed generations / S. Mousavizadeh, M.-R. Haghifam, B. T. Ghanizadeh [et al.] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2022. – Vol. 138. – P. 107938.

28. Optimal Configuration of Wind-Solar-Hydrogen Multi-Energy Complementary Microgrid With Demand Side / W. Chen, W. Fu, Y. Han [et al.] // Xinan Jiaotong Daxue Xuebao. – 2021. – Vol. 56, № 3. – P. 640–649.

29. Voltage stability enhancement in grid-connected microgrid using enhanced dynamic voltage restorer (EDVR) / A. Iqbal, A. Waqar, S. Haider [et al.] // AIMS Energy. – 2021. – Vol. 9, № 1. – P. 150–177

30. ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст : введен впервые : дата введения 2014-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 19 с. – Текст : непосредственный.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 г. Выпуск 1 (64). С. 79–100

УДК 004.94:551.583
DOI: 10.18822/byusu20220179-100

ИССЛЕДОВАНИЕ СОГЛАСОВАННОСТИ ИЗМЕНЕНИЙ ГЕЛИОКОСМИЧЕСКИХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТНОГО ФАЗОВОГО АНАЛИЗА

Алексеев Валерий Иванович
доктор технических наук,
профессор кафедры цифровых технологий
Института цифровой экономики
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: v_alekseev@ugrasu.ru

Актуальность исследования обусловлена необходимостью установления истинных причин и закономерностей изменений температур в странах и континентах, климата на Земле.

Цель: установление закономерностей и причин изменений гелиокосмических, климатических переменных в условиях глобального потепления.

Объекты: временные ряды гелиокосмических, глобальных и региональных климатических переменных, магнитных полей Солнца и Земли.

Методы: разработанный автором вейвлетный фазовый метод взаимодействия переменной с группами гелиокосмических и климатических факторов, магнитных полей Солнца и Земли в частотной и временной областях, сравнительный анализ.

Результаты: 1. В вейвлетной фазо-частотной области по силе влияния солнечной энергии, гелиокосмических переменных, изменяющиеся барицентрическими движениями Солнца, гравитационными силами, изменения температур в странах и континентах, в частях света, разделяются на несколько классов, значительно, положительно и отрицательно согласованные с изменениями барицентрических движений Солнца, гелиокосмических переменных; распределения классов изменений температур на континентах значительно согласованы с распределением аномального магнитного поля Земли с полюсами в Канаде, Восточной Сибири (Якутии), Бразилии, Южной Америке и Африке, Антарктике, в странах Среднего и Бижнего Востока. 2. При этом наблюдается высокая согласованность изменений географического и магнитных полюсов Земли, изменений глобальной температуры, температуры в зоне 60-85 ^{0} с.ш., в северном полушарии, в Арктике с изменениями магнитных полей Солнца и Земли, солнечного ветра, согласованные с изменениями барицентрических движений Солнца, гелиокосмических переменных; наблюдается сравнительно низкое влияние изменений магнитного поля Солнца на изменение температуры в южном полушарии. 3. На графиках изменений фазо-временных характеристиках температурных переменных в современности в странах и континентах, температур в арктических зонах Северного полушария, осадков в районах арктических морей, аномалий годовых сумм прямой солнечной радиации, солнечного сияния по территории России, гелиокосмических и климатических факторов, определяющих климат на Земле, полученных в разных интервалах времени, отображаются разнонаправленно, хаотически изменяюшиеся фазовые структуры, переходящие в соответствии с изменениями барицентрических движений Солнца, в организованные однонаправленно изменяющиеся структуры, приводящие к усилению естественного парникового эффекта, усилению взаимодействия, генерации парниковых газов и приземной температуры в атмосфере с проявлением глобального потепления – явления, наблюдаемого в самоорганизующихся сложных динамических системах.

Ключевые слова: временные ряды гелиокосмических и климатические переменных, вейвлетные фазо-частотные и фазо-временные характеристики сигнала, саморганизующаяся климатическая система, парниковый эффект, глобальное потепление

STUDY OF CONSISTENCY OF CHANGES IN HELIOCOSMIC AND CLIMATIC VARIABLES UNDER GLOBAL WARMING BASED ON WAVELET PHASE ANALYSIS

Valeriy I. Alekseev
Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Digital Technologies,
Institute of Digital Economy,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: v_alekseev@ugrasu.ru

The relevance of the research is due to the need to establish the true causes and regularities of temperature changes in countries and continents and climate on Earth.

Objective: to establish the regularities and causes of changes in heliocosmic and climatic variables under conditions of global warming.

Objects: time series of heliocosmic, global and regional climatic variables, magnetic fields of the Sun and the Earth.

Methods: the wavelet phase method of interaction of a variable with groups of heliocosmic and climatic factors, magnetic fields of the Sun and the Earth in frequency and time domains, the comparative analysis developed by the author.

Results: 1. In the wavelet phase-frequency domain on the strength of the influence of solar energy, heliocosmic variables, changing barycentric movements of the Sun, gravitational forces, temperature changes in countries and continents, parts of the world, are divided into several classes, significantly, positively and negatively coordinated with changes of barycentric movements of the Sun, heliocosmic variables; distribution of classes of temperature changes on continents significantly coordinated with the distribution of the anomalous magnetic field of Earth with poles 2. At the same time there is a high consistency of changes in geographical and magnetic poles of the Earth, changes in global temperature, temperature in the zone 60-85 ^{o} N, in the northern hemisphere, in the Arctic with changes in the magnetic fields of the Sun and Earth, solar wind, consistent with changes in the barycentric movements of the Sun, heliocosmic variables; there is a relatively low influence of the solar magnetic field changes on temperature change in the southern hemisphere. 3. On graphs of changes of phase-time characteristics of temperature variables in modernity in countries and continents, temperatures in Arctic zones of Northern hemisphere, precipitation in areas of Arctic seas, anomalies of annual sums of direct solar radiation, solar lights on territory of Russia, heliacosmic and climatic factors determining climate on Earth, received in different time intervals, differently, chaotically changing phase structures are displayed, changing according to changes of baricenter motion.

Keywords: time series of heliospace and climate variables, wavelet phase-frequency and phase-time signal characteristics, self-organizing climate system, greenhouse effect, global warming

Введение

Текущее состояние климата и его изменения волнует человечество во все времена и в особенности в современности, когда эти изменения сопровождаются неравномерным потеплением на континентах и полушариях, ростом в настоящем и ожиданием в будущем опасных природных явлений (ОЯ) и значительными ущербами; при этом характерно толкование причин многих изменений ростом антропогенного, углеродного фактора, усиления парникового эффекта.

В основу исследований, представленных в статье, приняты положения о том, что: а) изменения параметров всех природных сред обусловлены одновременными влияниями двух групп факторов: гелиокосмических и климатических (изменяются влияниями гелиокосмических переменных), ведущим из которых является барицентрические движения Солнца; б) изменения переменных отображаются на изменениях их вейвлетных фазо-частотных и фазо-временных характеристик; в) результаты изменений группы исследуемых переменных могут быть представлены в двух системах координат: в фазо-частотном и фазо-временном, полученных в равных интервалах наблюдений по времени; согласованности изменений графиков группы переменных оцениваются двумя матрицами линейных корреляций [1-3].

Цель исследований: используя введенные положения, показать циклическую изменчивость согласованностей вейвлетных фазо-частотных и фазо-временных характеристик группы гелиокосмических и климатических переменных от хаотически разнонаправленных изменений к локальным по времени однонаправленным согласованным изменениям, усилению естественного парникового эффекта с проявлением глобального потепления, обусловленные барицентрическими движениями Солнца и гелиокосмических переменных, свойственных сложной самоорганизующейся климатической системе.

Результаты исследований и обсуждения

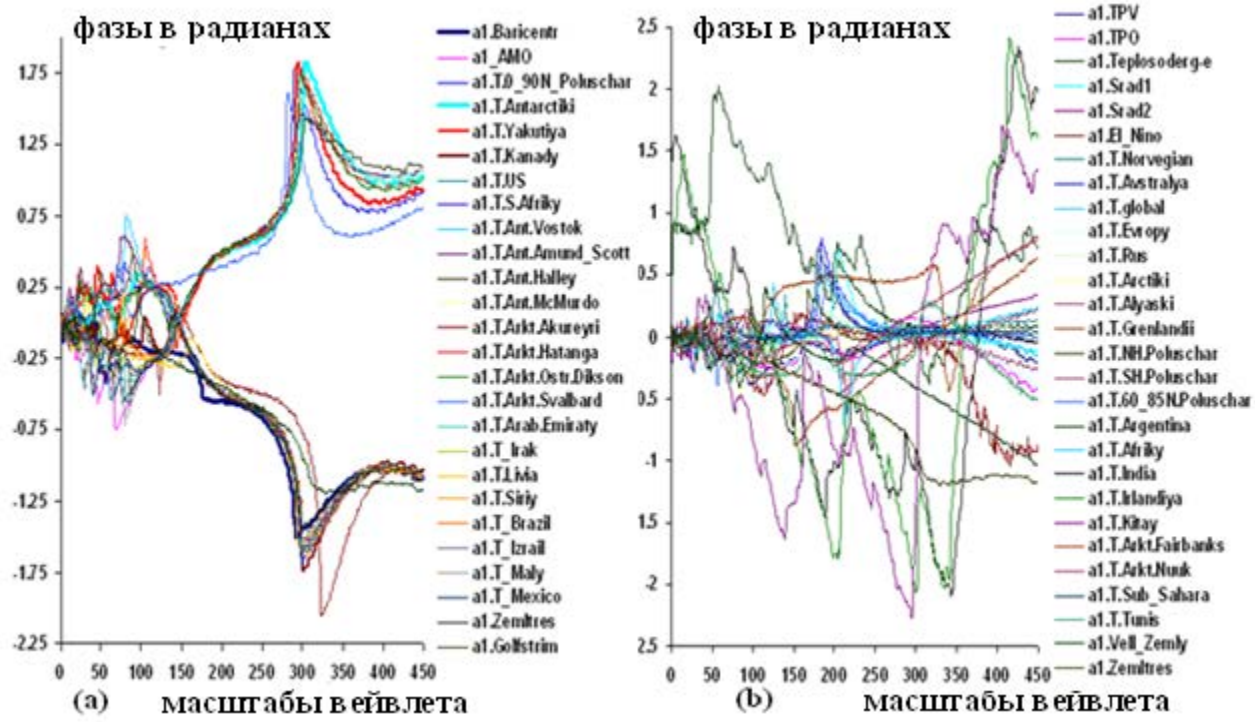
Вейвлетный фазовый анализ изменений температур в странах и континентах

Исследования основаны на использовании вейвлетного фазового метода анализа климатических данных, изложенного и использованного в [1-3] с проведением следующих действий: 1) определение набора исследуемых, сравниваемых переменных $f_i(t)\ \ i=1,...,n$, – временных рядов; 2) получение вейвлет-преобразований $\varphi_{f_i i}(a,b)$ [1]; 3) вычисление фазо-частотных $a1=\varphi_{f_i i}(a,\bar{b})$ и фазо-временных $a2=\varphi_{f_i i}(\bar{a},b)$ характеристик в равных интервалах времени, где $\bar{a}$, $\bar{b}$ знаки вычислений средних в преобразованиях $\varphi_{f_i i}(a,b)$: $a1=\varphi_{f_i i}(a,\bar{b})-$ усреднение матрицы $\varphi_{f_i i}(a,b)$ по столбцам (времени b); $a2=\varphi_{f_i i}(\bar{a},b)$ - усреднение матрицы $\varphi_{f_i i}(a,b)$ по строкам (масштабам вейвлета); 4) построение графиков функций $\varphi_{f_i i}(a,\bar{b})$ и $\varphi_{f_i i}(\bar{a},b)$ на двух рисунках; 5) вычисление двух матриц корреляций $A(\varphi_{f_i i}(a,\bar{b}))$ и $A(\varphi_{f_i i}(\bar{a},b))$ между одноименными характеристиками переменных; 6) анализ результатов. Здесь $a-$ задаваемый исследователем масштаб вейвлета '*cgau*5', зависящий от состава частот сигнала $f(t)$, временного интервала наблюдения $b\subseteq[t_н,t_к]$, t_n. t_k - начало и конец наблюдения сигнала с отчетами с единичным шагом. В исследованиях используется положение: а) гелиокосмические переменные подвергаются взаимовоздействию и воздействию барицентрических движений Солнца; б) климатические переменные подвергаются взаимовоздействию и воздействию гелиокосмических переменных.

В группу, влияющих на изменение приземных температур на континентах включены гелиокосмические и климатические переменные. В составе гелиокосмических факторов использованы графики изменений: барицентрических движений Солнца (Baricentr), солнечной активности (Sact), многолетней солнечной инсоляции (Insol), угла наклона земной оси к плоскости орбиты (Naklon), вулканических извержений (Vulkan), общего содержания озона (ОСО) в единицах Добсона в районе Ароза (ОСО.Aroza), парниковых газов (CH_4, CO_2, N_2O), уровня мирового океана (УМО). В составе климатических переменных использованы изменения переменных: температуры воздуха над сушей (TPV) и океаном (ТРО),теплосодежание океана в 700 метровом слое (Teplosoderg-e), приходящей к Земле солнечной радиации (Srad1), разность солнечной радиации, приходящей в экваториальную и по-

лярные области Земли (Srad2), южные осцилляции (El-Nino), глобальной температуры (T.global) [1-2]. Исследованы изменения приземных температур в странах и на континентах: Австралии (T.Avstralii) [4],Европы (T.Evropy) [5], России (T.Rus) [6], Антарктики (T.Antarctiki) [7], Арктики (T.Arktiki) [7], Канады (T.Kanady) [8], Аляски (T. Alyaski) [8], Гренландии (T.Grenlandii) [9], Якутии (T.Yakutia) [10], центральной Африки (T.Afriky) [11] и южной Африки (T.S. Afriky) [11], Индии (India) [12], объединенной Америки (T.US) [13], Ирландии (T.Ireland) [14], Аргентины (T.Argentina) [15], Китая (T.Kitaj) [16], в двух (южном и северном) полушариях земного шара (T.SH.Polushary, T.NH.Polushary) [17], в зоне 60-85^0 NH Северного полушария [18], изменения температур на метеостанциях в Арктике [7]: Fairbanks (64,8 N, 147,9 W), Nuuk (64,2 N, 51,8 W), Akureyri (65,7 N, 18,1 W), Svailbard (78,2 N, 15,5 E), Ostrov Dikson (73,5 N, 80,4 E), Hatanga (72,0 N, 102,5 E), Антарктике [7]: Halley (75,5 S, 26,6 W), Vostok (78,5 S, 106,9 E), Amundsen-Scott (90,0 S, 0,0 E; South Pole), McMurdo (77,8 S, 166,7 E); изменения скорости вращения Земли [19], количества землетрясений (Zemletres) [20], Гольфстрима (Golfstrim) [21], Северо-Атлантического колебания (AMO) [22].

На графиках рисунка 1 приведены изменения фазовых характеристик исследуемых групп переменных.



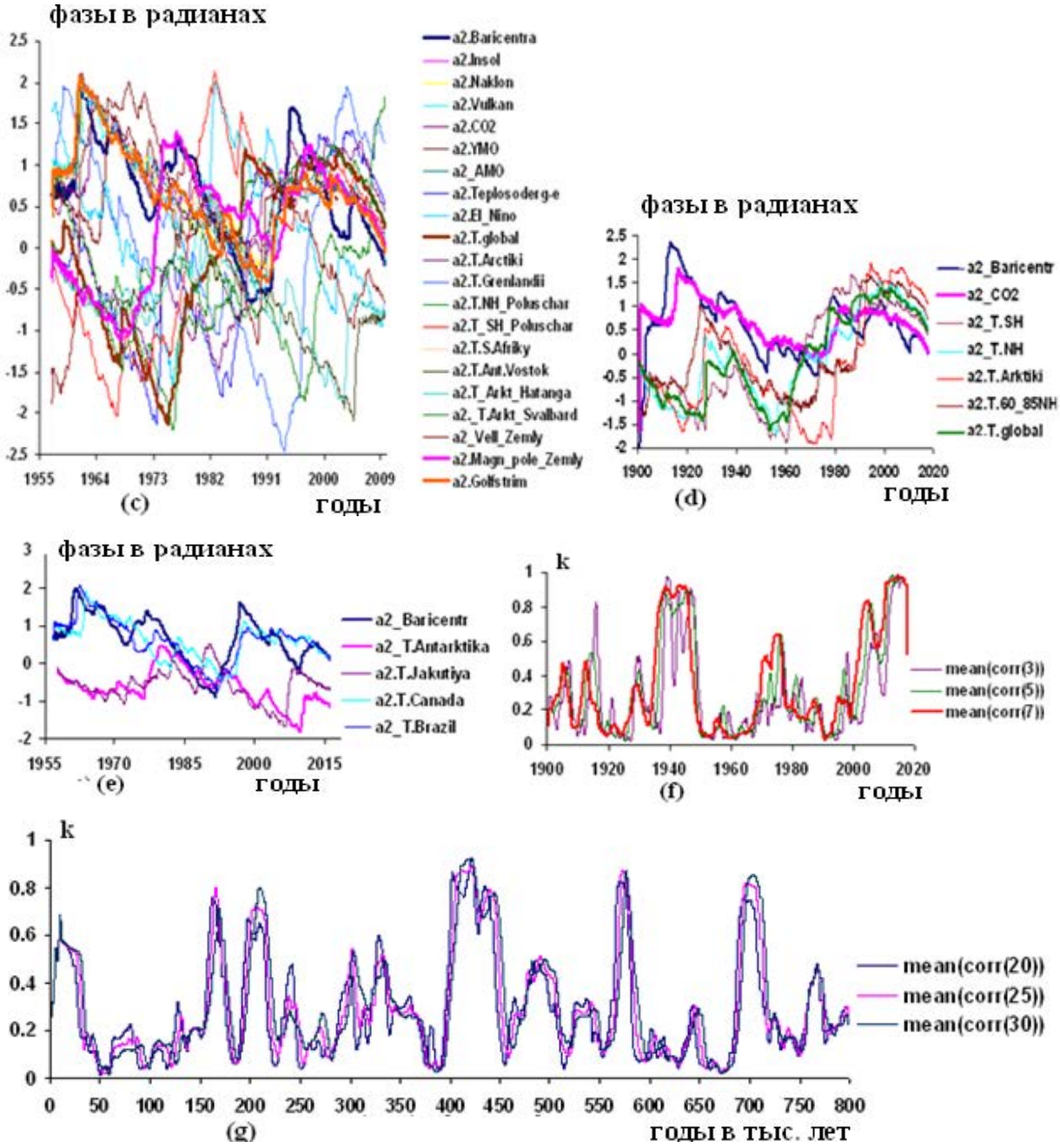


Рисунок 1. Графики: (a) фазо-частотных характеристик изменений барицентрических движений Солнца (Baricentr) [23], AMO, Zemletres, Golfsrim, изменений температур воздуха в северных широтах (0-90°), Антарктике, Якутии, Канаде, на станциях Akureyri, Hatanga, Ostr.Dikson, Svalbard в Арктической зоне, на станциях Halley, Vostok, Amundsen-Scott, McMudro в Антарктической зоне, на территориях Соединенных Штатов (US), южной Африки, Ирака, Ливии, Сирии, Бразилии, Израиля, Мали, Мексики; (b) фазо-частотных характеристик климатических переменных (TPV, TPO, Teplosoderganie, Srad1, Srad2, El-Nino, Temp.global), изменений температур в Норвегии, Австралии, Европе, России (Rus), Арктике, Аляске, Гренландии, в северном и южном полушариях (NH,SH. Poluschar), в зоне 60-85° NH.Poluschar, Аргентине, Суб-Сахаре и центральной Африки, Индии, Ирландии, на станциях Arkt.Fairbanks, Arkt. Nuuk (Арктической зоны), в Тунисе; (c) фазо-временных характеристик гелиоклсмических переменных (Baricentr, Insol, Naklon,Vulkan, CO_2, YMO, AMO), климатических переменных (Teplosoderganie, El-Nino, Temp.global), изменений температур в Арктике, Гренландии, в полущариях Земли NH и SH, в Южной Африке, на станции Восток в Антарктике, на станциях Hatanga, Svailbard Арктики, изменений скорости вращения и магнитного поля Земли, изменений температуры течения Гольфстрим по наблюдениям в 1956,9-2009,5 гг; (d) фазо-временные характеристики: Baricentr, CO_2, изменений температур в

полушариях T.SH, T.NH, в Арктике, в зоне T.60-85° NH с.ш.,T.global по наблюдениям 1900,8-2017,7 гг., разности фаз a2.T.global-a2. CO_2 ; (e) фазо-временных характеристик: Baricentr, температур в Антарктике, Канаде, Якутии и Бразилии по наблюдениям в 1956,9-2016,5; (f) коэффициента (k) согласованностей изменений фазо-временных характеристик группы 8 переменных (Baricentr, CO_2, T.SH,T.NH, T.Arktiky, T.0-90NH,T.60-85NH, T.global) по наблюдениям в 1900,8-2017,7 гг ; (g) коэффициента (k) согласованностей изменений фазо-временных характеристик группы переменных: кривой инсоляции М. Миланковича для 65° с.ш. (Insol), угла наклона земной оси к плоскости орбиты (Naklon), эксцентриситета и климатической прецессии орбиты Земли [24], магнитосферы Земли [25], парниковых газов CH_4, CO_2, приземной температуры (Temp), полученные бурением ледовых скважин в Антарктике [26], соответствующие изменению истории климата от современности до 800 тыс. лет в прошлом с точностной характеристикой около тыс. лет [26].

В изменении вейвлетных фазо-частотных характеристик температур воздуха объектов, приведенных на графиках рисунка 1 следуют закономерности: 1) по силе влияния солнечного излучения, гелиокосмических переменных, изменяющиеся барицентрическими движениями Солнца, гравитационными силами, изменения температур, природных сред в странах и континентах, в частях света, разделяются на несколько классов; 2) на графиках (a) рисунка 1 выделены два класса объектов, значительно, с k = |0,74-0,99|, положительно и отрицательно согласованные с изменениями гелиокосмических переменных, с изменениями барицентрических движений Солнца (гравитационных сил); к группе переменных, положительно согласованных с изменениями барицентрических движений Солнца относятся изменения температур в: Канаде (канадская Арктика), в жарких регионах: Соединенных Штатов Америки (US), Южной Африки, Арабских Эмиратов [27], Ирака [28], Ливии [29], Сирии [30], Израиля [31], Мали [32], Мексики [33], Бразилии [34], в Курской области [35] и в холодном районе Арктической станции Akureyri (Исландия, влияние Гольфстрима), а также потока солнечного ветра [36], Гольфстрима; к группе переменных, отрицательно согласованных с изменениями барицентрических движений Солнца относятся изменения температур в холодных районах: зона 0-90°N с.ш., Якутия, Антарктика в целом и ее районы: Halley, Vostok, Amundsen-Scott, McMurdo, районы Арктических станций: Ostrov Dikson, Hatanga, Svalbard (Норвегия. холодный край). 3) Отметим, что районы Канады, Якутии, Южной Америки и Африки, Антарктики относятся к областям магнитных аномалий и областями их притяжений, показывая, что магнитное поле Земли, управляемое солнечным ветром, барицентричекими движениями Солнца, является главным учатником управления климатом на Земле; 4) На изменения температур объектов, приведенных на графиках (a) рисунка 1, существенны, с k = |0,10-0,96| и изменения климатических переменных, с наибольшими влияниями YMO, TPV, Srad2, El-Nino, изменения течения Гольфстрима и колебания AMO, изменения скорости вращения Земли и землетрясения, присутствует и изменение магнитного поля Земли. 5) В частотной области, на графиках (b) рисунка 1, выделяется семейство температурных переменных, изменяющихся почти симметрично с k ~|0,10-0,75| влияниями гелиокосмичеких и климатических переменных с размахом ± 0,25 по фазе на высоких периодах изменений переменных, влияниями изменений скорости вращения и магнитного поля Земли, также изменяющихся барицентрических движений Солнца. 6) Выделяются изменения температур в Индии, Ирландии, Китае, отличающихся от больщинства значительным размахом с ± 2,25 радиан в фазовых изменениях, характеризующее значительные перепады температур в регионах. 7) На графиках (a) и (b) рисунка 1 выделяется масштаб вейвлета $a \approx 300$; на временной оси, на графиках (c), (d) рисунка 1 характеристик переменных, соответствующее 1987-1992 годам, происходит перестройка изменений переменных из разнонаправленных, решетчатых, хаотических в согласованные однонаправленные изменения с взаимоусилением парниковых газов и температурных изменений на Земле, парникового эффекта [37, 38]; 7) на графиках (d) временных характеристик переменных отображаются согласованности и перестройки изменений CO_2, температурных переменных в регионах, в полущариях, глобальной температуры в

современности с изменениями барицентрических движений Солнца Baricentr; наблюдается рост приземной температуры с 1954,4 года и ее рост превышает рост CO_2 с 1970 г.; рост глобальной температуры устойчиво превышает рост CO_2 с 1987 года. 8) На графиках (e) фазо-временных характеристик рисунка 1 отражается изменения переменной Baricentr в согласованности с изменениями температуры в Канаде и Бразилии в противофазе с изменениями температур в зонах Антарктики и Якутии, обусловленные влиянием магнитного поля Земли. 9) На графиках (f) рисунка 1отражаются изменения коэффициентов согласованностей температурных переменных в Арктике, в полушариях, глобальной температуры, управляемые изменениями барицентрических движений Солнца, приведенных на графиках (d) рисунка 1; кривые получены усреднением коэффициентов корреляций по наблюдениям 3, 5 и 7 лет в скользящем режиме по 10 дискретов между годами. 10) На графиках (g) рисунка 1 отображаются изменения коэффициентов корреляций вейвлетных фазо-временных характеристик группы гелиокосмических переменных: кривой инсоляции М. Миланковича для 65° с.ш. (Insol), угла наклона земной оси к плоскости орбиты, эксцентриситета и климатической прецессии орбиты Земли, магнитосферы Земли, парниковых газов и климатической приземной температуры (Temp), полученные бурением ледовых скважин в Антарктике, соответствующие изменению истории климата от современности до 800 тыс. лет в прошлом. Графики получены усреднением коэффициентов корреляций группы переменных, вычисленные в текущие моменты времени, по наблюдениям 20, 25 и 30 тыс лет в скользящем режиме; в изменениях кривых наблюдаются циклы значительных взаимоусилений переменных с k = 0,76-0,91 с продолжительностями до 50 тыс. лет.

Вейвлетный фазовый анализ изменений магнитного полей Солнца и Земли, изменений географического полюса и скоростей изменений магнитных полюсов Земли по наблюдениям в 1910,9–1999,8 годы

В группу исследуемых переменных включены изменения: барицентрических движений Солнца (Baricentr), солнечной активности (Sact), угла наклона Земли (Naklon), вулканических извержений (Vulkan), двуокиси углерода (CO_2), Землетрясений (zemletryas-e), индекса – аа геомагнитной активности (Ind –аа Sun) [25], напряженности магнитного поля гелиосферы у Земли (Napr.M.pole.Sun) [39], скорости солнечного ветра (vel.Sun.veter) [36], магнитного поля Земли (M.pole.Zemly) [40], скорости вращения Земли (Vel.Zemly) [19], северного географического полюса Земли (R.geograf.polus) [41], скорости изменений северного и южного магнитных полюсов Земли (Vel. magn.pol.N, Vel.magn.pol.S) [42].

В изменении графиков фазовых характеристик гелиокосмических переменных, содержащих и изменения магнитных полей Земли и Солнца, CO_2,T.global, солнечного ветра, движений географического полюса и магнитных полюсов Земли наблюдаются следующие закономерности: 1) На графиках (a) рисунка 2 наблюдается относительная смещенность частот изменений составляющих группы на низких частотах (высоких масштабах вейвлета), отрицательность фаз изменений скорости вращения Земли и приземной температуры относительно изменений фаз в группе; 2) высосогласованное однонаправленное изменение всей группы переменных с k = (0,48-0,97) в частотной области за исключением изменений скорости вращения Земли с k = – (0,55-0,90) с отрицательной фазой, обусловленное откликом неоднородной по строению Земли на воздействия Солнца и его планет [43]; при этом изменения географического и магнитных полюсов Земли наиболее согласованы с изменениями барицентрических движений Солнца, землетрясений и магнитного поля Земли с k = 0,81 (0,01) по наблюдениям в 1910,9-1999,8. 3) В фазо-частотной области наблюдается высокая согласованность изменений CO_2 с изменениями гелиокосмических переменных, магнитного полей Солнца и Земли, географических и магнитных полюсов Земли с k = 0,57-0,95; приземной температуры с k = – (0,18-0,79). 4) В фазо-временной области изменения трех полюсов Земли

(географического и магнитных) согласованы с изменениям других переменных в группе с k = 0,29-0,57; на графиках (b) и (d) фазо-временных характеристик рисунка 2 проявляется высокая согласованность изменений магнитных полей Солнца и Земли, гелиокосмических переменных, магнитных и географического полюса Земли, а также изменений CO_2 и глобальной температуры T.global в наблюдаемом интервале времени, проявляется выраженная изменчивость, согласованность, перестройка изменений переменных по фазе и времени, быстрый рост приземной температуры, опережающий рост CO_2 с ~ 1980 года с изменениями барицентрических движений Солнца; проявляется следование изменений всех переменных в группе за изменениями барицентрических движений Солнца.

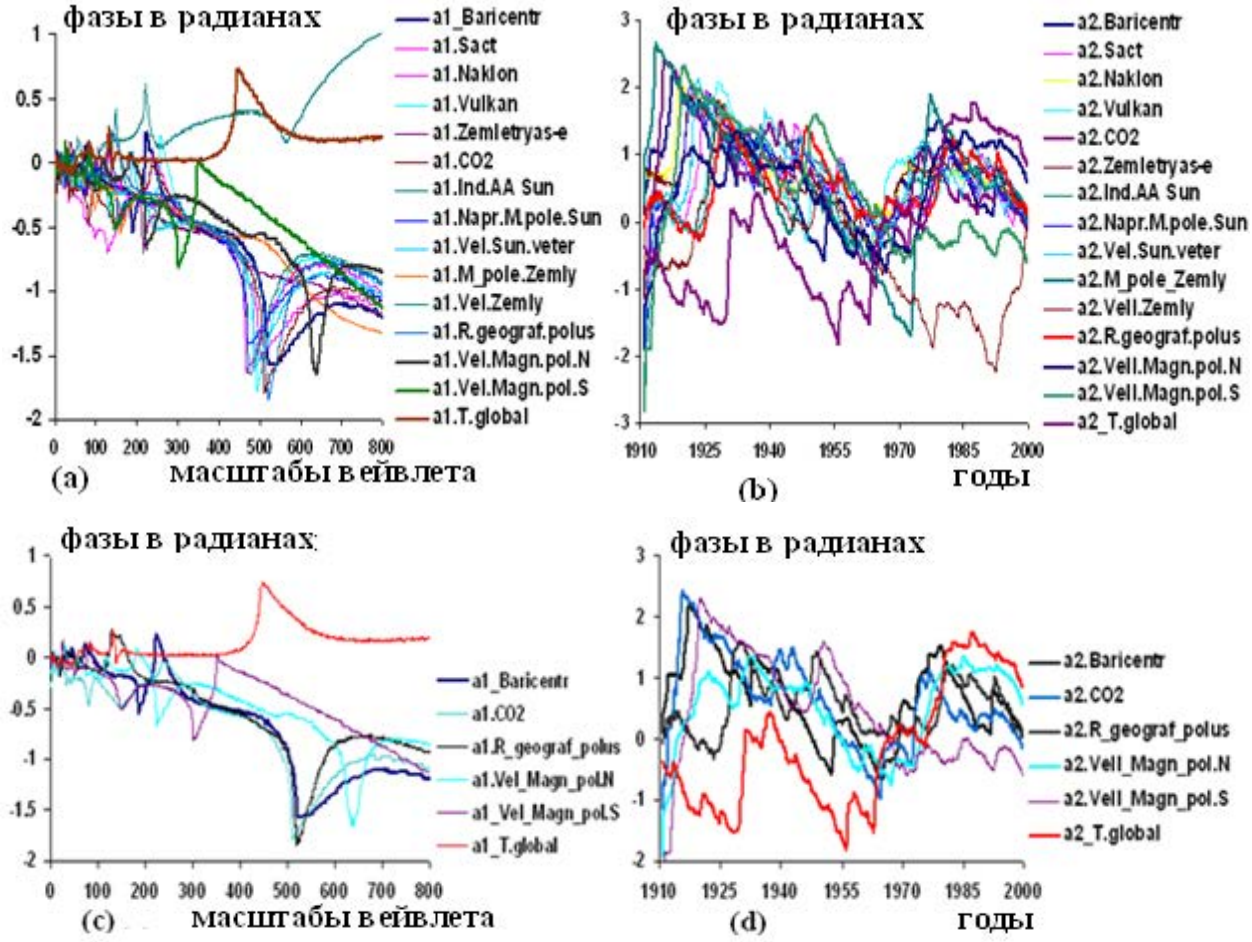


Рисунок 2. Графики изменений вейвлетных: (a) и (b) фазо-частотных и фазо-временных характеристик гелиокосмических переменных (барицентрических движений Солнца (Baricentr), солнечной активности (Sact), угла наклона Земли (Naklon), вулканических извержений (Vulkan), двуокиси углерода (CO_2), землетрясений (zemletrys), индекса геомагнитной активности (Ind-aa), напряженности магнитного поля гелиосферы у Земли (Napr.M.pole.Sun), скорости изменений солнечного ветра (vel.Sun.veter, скорости вращения Земли (vel.Zemly), географического полюса Земли (R.geograf.polus), скорости изменений магнитных полюсов Земли: северного (vel.magn.pol.N), южного (vel.magn.pol.S); глобальной температуры (T.global); (c) и (d) фазо-частотных и фазо-временных характеристик: барицентрических движений Солнца, двуокиси углерода CO_2, географического полюса Земли, скорости изменений магнитных полюсов Земли: северного и южного, глобальной температуры T.global

Фазовый вейвлетный сравнительный анализ изменений температур воздуха: глобальной, в зоне 60–85° с.ш., в северном и южном полушариях и в арктической зоне по наблюдениям в 1900–2000 годы

На графиках рисунка 3 приведены вейвлетные фазовые характеристики изменений группы исследуемых переменных: гелиокосмических, изменений магнитных полей Солнца и Земли, температурных переменных в полушариях Земли

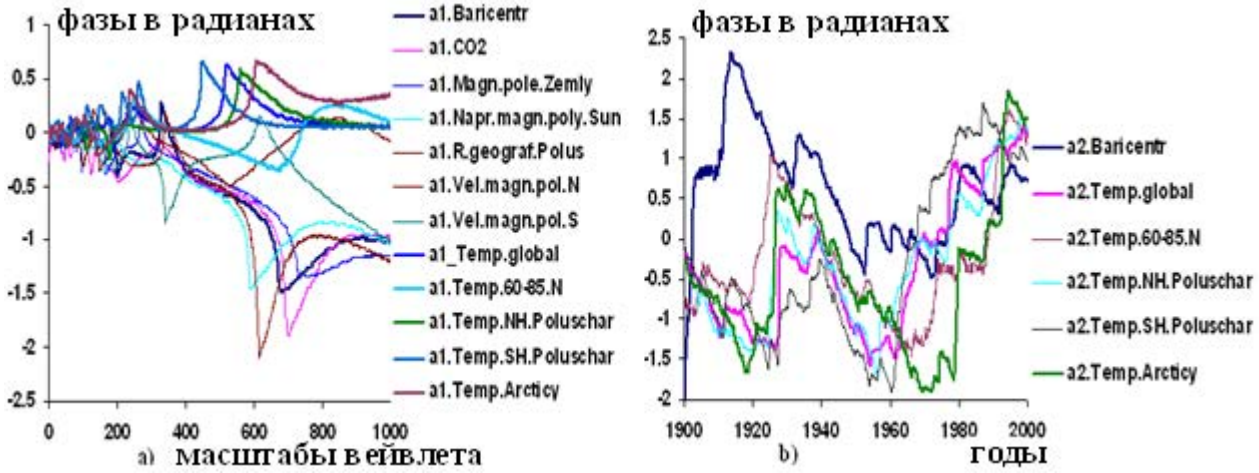


Рисунок 3. Графики изменений вейвлетных: (a) фазо-частотных характеристик: барицентрических движений Солнца (Baricentr), двуокиси углерода CO_2, магнитного поля Земли (Magn.pole.Zemly), напряженности магнитного поля гелиосферы у Земли (Napr.magn.poly.Sun), дальности географического полюса от условного международного начала координат (R.geograf.Polus), скоростей изменений магнитных полюсов Земли, северного и южного (Vel.magn.pol.N and S); температур: глобальной (Temp.global), в зоне 60-85° северной широты (Temp.60-85.N), в северном и южном полушариях (Temp.NH.Poluschar and SH.Poluschar), в Арктике (Temp.Arcticy); (b) фазо-временных характеристик: Baricentr, Temp.global, Temp.60-85.N, Temp.NH.Poluschar and SH.Poluschar, Temp.Arcticy

На графиках (a) рисунка 3 фазо-частотных характеристик переменных наблюдается условное разделение изменений группы на подгруппы, отличающиеся смещенностью по частотам и фазам. При этом изменения переменных: Baricentr, CO_2, магнитного поля Земли, напряженности магнитного поля гелиосферы у Земли, географического полюса Земли с относительно смещенными частотами образуют одну подгруппу, изменения всех температурных переменных образуют вторую подгруппу, в которой изменение температуры в зоне 60-85° N отличается по частотам от изменений температур в других зонах; изменения скоростей магнитных полюсов Земли происходят в противофазах со смещенными частотами.

На графиках (b) рисунка 3 фазо-временных характеристик переменных наблюдается согласованные изменения температурных переменных в выделенных пяти зонах с изменениями барицентрических движений Солнца, следование изменений температурных переменных в фазах и противофазах (направленностях) за изменениями движений Солнца в системе.

Таблица – Коэффициенты согласованностей изменений в температурных зонах земного шара с изменениями гелиокосмических факторов, магнитных полей Земли и Солнца и климатических переменных в фазо-частотной области (в скобках указаны стандартные отклонения от средних)

variables	T.global	T.(60-85^0) N	T.NH	T.SH	T.Arctic
heliococmic	-0,46 (0,10)	0,33 (0,10)	0,30 (0,11)	0,04 (0,06)	-0,76 (0,07)
magnetic fields	-0,43 (0,24)	0,49 (0,32)	0,29 (0,29)	0,07 (0,04)	-0,77 (0,06)
climatic	|0,04-0,63|	|0,36-0,72|	|0,01-0,55|	|0,17-0,68|	|0,04-0,36|

В исследованиях, представленных в таблице, наблюдаются значительные отличия изменений температур в введенных зонах земного шара, обусловленные отличиями влияний действующих факторов: (гелиокосмических (гравитационных сил, энергии Солнца), магнитных полей Солнца и Земли, климатических); значительных влияний изменений климатических переменных на изменение глобальной температуры, температуры в зонах .(60-85^0) N и T.SH (южного полушария); наблюдается слабое влияние изменений магнитного поля Солнца на изменчивость температуры в южном полушарии и значительное их влияние на изменчивость температуры а Арктике, скорее всего обусловленное влиянием аномалий магнитного поля Земли, расположенных на территориях Канады и Восточной Сибири (Якутии), согласованные с изменениями барицентрических движений Солнца с разными знаками.

Вейвлетный фазовый анализ изменений температуры воздуха в свободной атмосфере, потеплений в тропосфере и похолоданий в нижней тропосфере для сезонов Северного полушария по наблюдения в 1981–2020 гг.

Отклики сезонных изменений температур в свободной атмосфере Северного полушария на воздействия геликосмических и климатических переменных исследованы в составе группы: Baricentr, Sact, Naklon; Srad1, Srad2, TPO, TPV, Temp.global; изменений сезонных аномалий температур (leto, oseny, zima, vesna) Северного полушария в тропосфере и стратосфере [18].

На графиках рисунка 4 приведены графики изменений фазо-частотных и фазо-временных характеристик группы переменных.

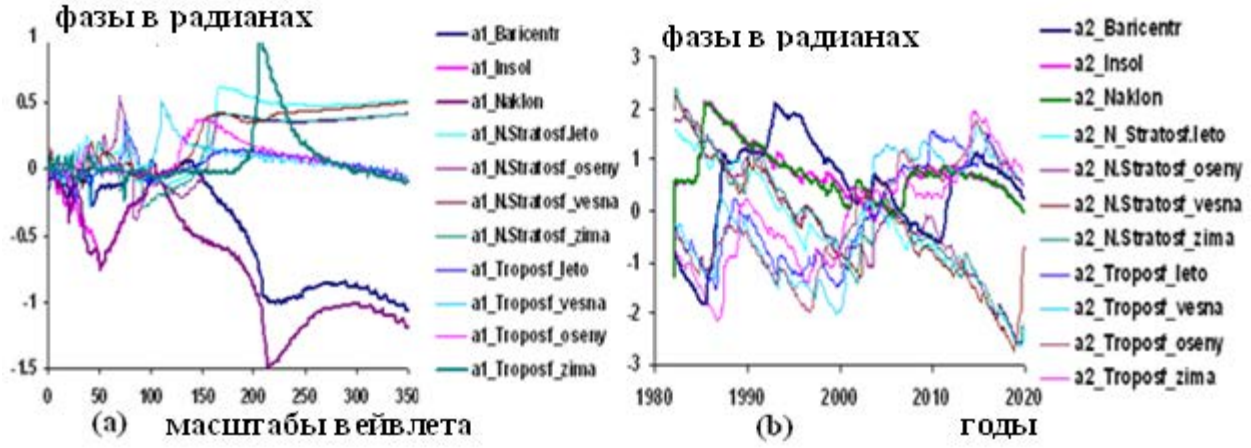


Рисунок 4. Графики изменений вейвлетных: (a) фазо-частотных и (b) фазо-временных характеристик геликосмических (Baricentr, Insol, Naklon) переменных и изменений сезонных аномалий температуры (leto, oseny, vesna, zima) в свободной атмосфере: стратосфере и тропосфере (Stratosf, Troposf)

В откликах фазовых характеристик исследуемых переменных, сезонных изменений температуры в свободной атмосфере на воздействия гелиокосмических и климатических переменных, обнаруживаются следующие закономерности: 1) существенные отличия изменений температур в нижней стратосфере и тропосфере на воздействия гелиокосмических переменных в частотной области; изменения температуры в стратосфере значительно и однонаправлено согласованы с k = – 0,83 (0,03); в тропосфере эти изменения разнонаправленны в сезонах: зимой согласованы с k = – (0,42-0,52), летом с k = – (0,19-0,32), весной с k = 0,24-0,30 и осенью с k = |0,05-0,17|; эти отличия отображаются на графиках (a) рисунка 4 фазо-частотных характеристик переменных. 2) В частотной области влияния климатических переменных на изменчивость температур в нижней стратосфере и тропосфере различны: а) на изменчивость температуры в нижней стратосфере существенны влияния Srad1, Srad2, TPO с k =|0,41-0,76| и незначительны влияния TPV и глобальной температуры с k =|0,02-0,16|; б) сезонная изменчивость температуры в тропосфере разнонаправленно согласована с измене-

ниями климатических переменных с k =|0,08-0,81|, наблюдается значительная согласованность изменений зимней температуры в тропосфере изменениями Temp.global, TPV, Srad1. 3) Во временной области наблюдается значительная изменчивость температуры в нижней стратосфере изменениями климатических переменных с k = |0,53-0,77| по сравнению с влиянием гелиокосмических переменных с k = |0,29-0,56|. 4) На графиках (b) рисунка 4 изменений фазо-временных характеристик переменных, изменений температур в стратосфере и тропосфере, наблюдается решетчатая структура изменений переменных, сходящихся и однонаправленно изменяющихся гелиокосмических, климатических и сезонных температурных изменений в тропосфере в последние десятилетия, обусловленные соответствующими изменениями этих переменных в частотной области.

Вейвлетный фазовый анализ аномалий среднегодовых температур воздуха для отдельных районов арктических морей и широтной зоны 60–85° Северного полушария по наблюдениям в 1937–2019,2 гг.

В группе исследуются подгруппы переменных: гелиокосмических (Baricentr, Insol, Naklon), климатических (T.global, Srar1, Srad2, TPO, TPV), температур воздуха для отдельных районов и широтной зоны 60-85° (Аляски (Alaska.rn), Атлантики (Atlantika.rn), Чукотки (Chukotka.rn), Канады (Kanada.rn, Зоны 60-85° (Zona,60-85°N), Северной Европы (Sever.Evropa.rn), Восточной Сибири (Vostok.Sibir.rn), Западной Сибири (Zanad.Sibir.rn) [18].

В откликах исследуемых переменных, температур воздуха в районах Арктических морей и зонах Северного полушария, на воздействия гелиокосмических и климатических переменных проявляются следующие закономерности: 1) в частотной области наблюдаются значительные с k = – 0,47 (0,14) однонаправленные влияния гелиокосмичеких переменных и разнонаправленные, с k = |0,08-0,73|, влияния климатических переменных на изменчивость температур в районах Арктики и арктический морей, с наибольшими влияниями изменений глобальной температуры, солнечных радиаций Srad1, Srad2 и TPV; 2) во временной области проявляются преимушественные влияния климатических факторов, с k = |0,17-0,91|, на изменчивость температуры в Арктике по сравнению с влиянием гелиокосмических факторов с k = |0,04-0,30|; 3) на графиках (a) и (b) рисунка 5 фазо-частотных характеристик переменных наблюдается однонаправленная высокая согласованность изменений температур в арктической зоне, чуть смещенные по частотам и фазам, характеризующие отличия в температурных изменениях на территориях; 4) на графиках (d) рисунка 5 изменений переменных во временной области трех групп переменных: глобальных гелиокосмических, климатических переменных и температурных изменений в полярной зоне 60-85° и арктических морей, наблюдается прямоугольная структура, переходящая после 1975 года в однонаправленные и согласованные изменения всех переменных, за исключением Srad2. Переменная Srad2 характеризует разность солнечной радиации, приходящей в экваториальную и полярные области Земли; на графике (d) рисунка 5 отражается превышение солнечной радиации в полярной зоне над экваториальной начиная с 1992 года. На графике (e) рисунка 5 отражается изменение, рост коэффициента согласованности изменений группы гелиокосмических, климатических переменных и изменений температур воздуха в арктической зоне в современности. Графики получены корреляцией фазо-временных характеристик группы исследуемых переменных, приведенных на графике (d) рисунка 5, усредненных по 3-х и 5-и летним наблюдениям в скользящем режиме.

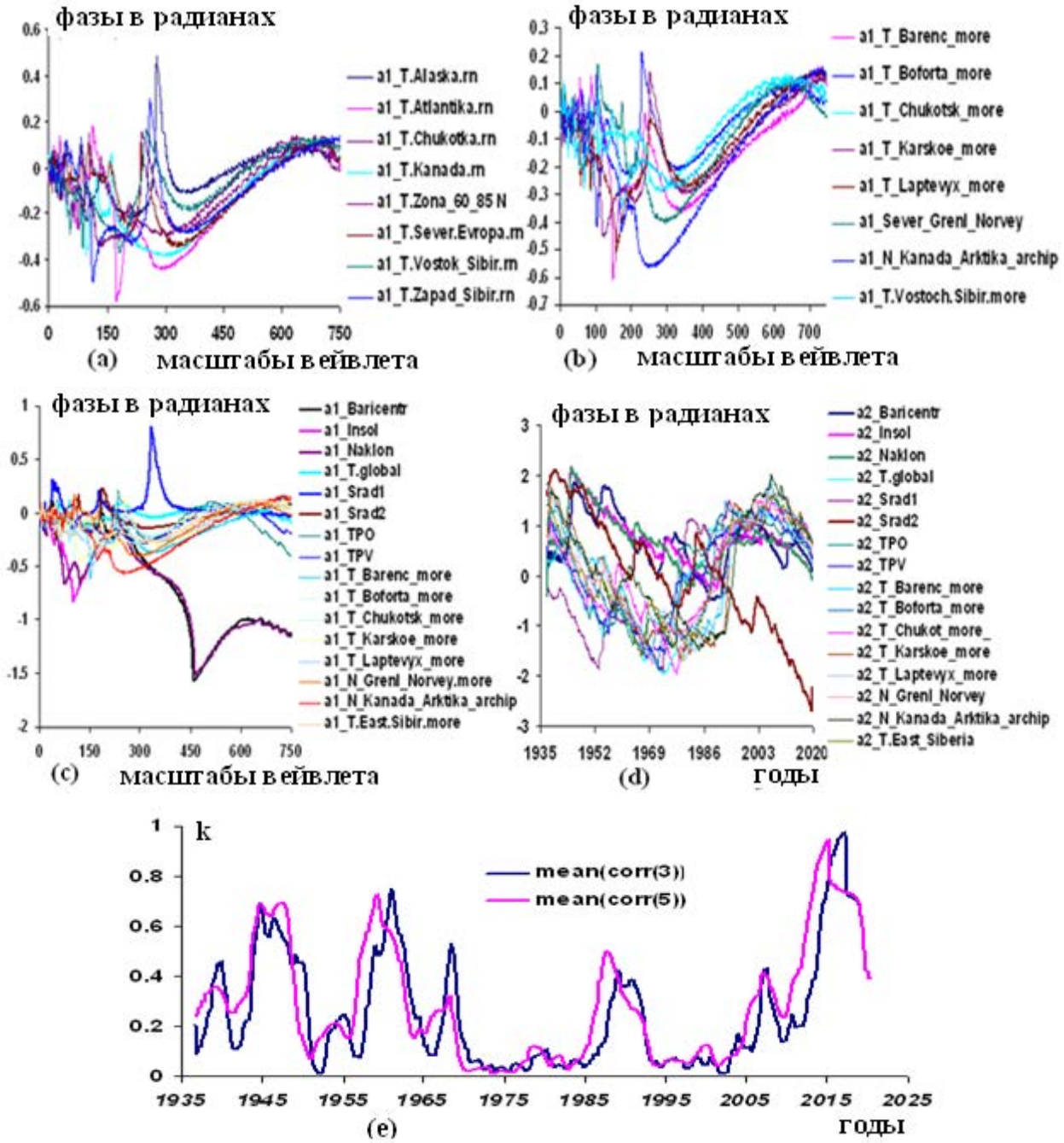


Рисунок 5. Графики вейвлетных фазо-частотных характеристик: (a) аномалий среднегодовой температуры воздуха для отдельных районов и широтной зоны 60-85° Северного полушария [19]: Аляскинского (Alaska.rn), Атлантического (Atlantika.rn), Чукоского (Chukotka.rn), Канадского (Kanada.rn), широтной зоны 60-85° (Zona.rn), Североевропейского (Sever.Evropa.rn), Восточносибирского (Vostok.Sibir.rn), Западносибирского (Zapad.Sibir.rn); (b) аномалий среднегодовой температуры воздуха для районов арктических морей Северного полушария [19]: Баренцево, Бофорта, Чукотское, Карское, Лаптевых, Северной части Гренландского и Норвежского морей, Северо-Канадского Арктического архипелага, Восточно-Сибирское; (c) фазо-частотных и (d) фазо-временных характеристик гелиокосмических переменных (Baricentr, Insol, Naklon), климатических: глобальной температуры (T.global), солнечных радиаций (Srad1, Srad2), температуры воздуха над океаном (TPO), температуры воздуха над сушей (TPV), температур воздуха в отдельных районах: Alaska.rn, Atlantika.rn, Chukotka.rn, Kanada.rn, Zona.60-85°.rn, Sever.Evropa.rn, Vostok.Sibir.rn, Zapad.Sibir.rn; e) коэффициентов (k) корреляций фазо-временных характеристик переменных, приведенных на графиках d рисунка 5, вычисленных в бегущем режиме с усреднениями 3 и 5 лет

Вейвлетный фазовый анализ годовых сумм осадков в районах арктических морей по наблюдениям в 1936–2020 гг.

Анализ проведен в группе гелиокосмических (Baricentr, Insol, Naklon), климатических (T.global, Sras1, Srad2, TPO,TPV) переменных и изменений годовых сумм осадков для районов арктических морей [18]: Barenc.more (Barenc.more), Бофорта (Os.Boforta.more), Чукотское (Os.Chukotckoe.more), Северная часть Гренландского и Норвежского морей

(Os.Grenl.Norvegy.more), Северная часть Канадского Арктического архипелага (Os.Kanada.Arktich.archip-g), Карское (Karskoe.more), Лаптевых(Laptevyx.more), Восточно-Сибирское море (Os.Vost.Sibir.more).

На рисунке 6 приведены графики изменений вейвлетных фазовых характеристик годовых сумм осадков арктических морей на воздействия гелиокосмических и климатических переменных.

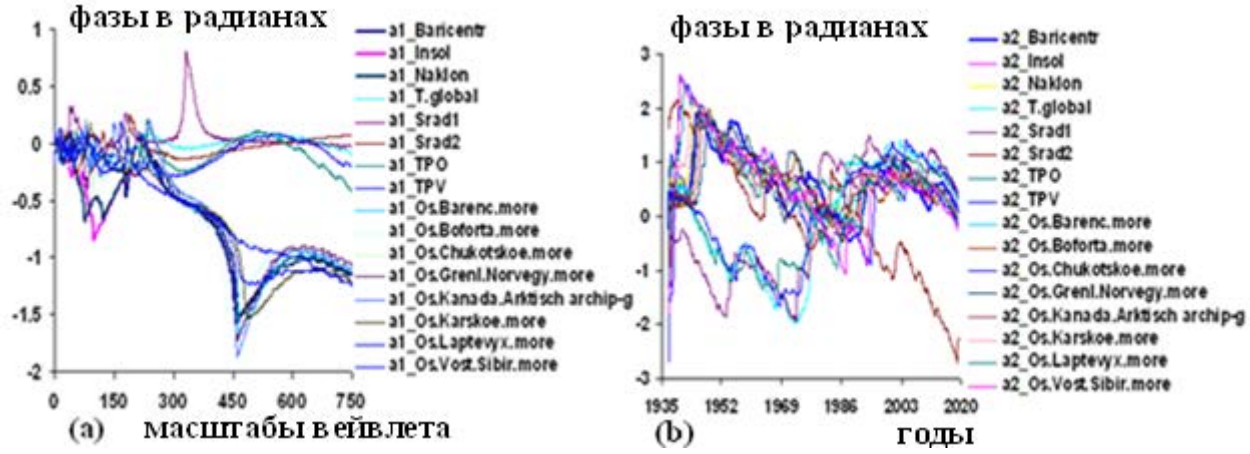


Рисунок 6. Графики изменений вейвлетных: (a) фазо-частотных и (b) фазо-временных характеристик гелиокосмических (Baricentr, Insol, Naklon), климатических (T.global, Sras1, Srad2, TPO,TPV) и осредненных годовых сумм осадков для районов арктических морей: Os.Barenc more, Os.Boforta more, Os.Chukotckoe more, Os.Grenl.Norvegy more, Os.Kanada.Arktich. archip-g, Os.Karskoe more, Os.Laptevyx more, Os.Vost.Sibir more

В откликах фазовых характеристик годовых сумм осадков для районов арктических морей на воздействия гелиокосмических и климатический переменных проявляются следующие закономерности: 1) в частотной области изменения осадков в районах арктических морей однонаправлено и значительно, с k = 0,92 (0,04), согласованы с изменениями гелиокосмических переменных; с изменениями климатических переменных согласованы разнонапрвленно с k =$|0{,}14 - 0{,}53|$ с наибольшими влияниями T.global и TPV; 2) во временной области изменения осадков в районах арктических морей существенно и однонапрвленно согласованы с изменениями гелиокосмических переменных с k = 0,75 (0,09), влияниями климатических переменных согласованы разнонаправленно с k = =$|0{,}11 - 0{,}58|$: 3) в частотной области изменения осадков в районах арктических морей взаимосогласованы с k = 0,94 (0,04), во временной области взаимосогласованы с k = 0,74 (0,17); 4) во временной области на графиках (b) рисунка 6 наблюдается перестройка четырехугольной структуры из фазо-временных характеристик переменных в однонапрвленные согласованные изменения переменных, как на графиках изменений фазо-временных характеристик на других рисунках.

Вейвлетный фазовый анализ пространственно-осредненных годовых и сезонных сумм прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность по наблюдениям в 1961.5–2018.4 гг.

Исследоавны группы гелиокосмических (Baricentr, Insol, Naklon, CO_2), климатических (T.global, Sras1, Srad2, TPO,TPV) переменных и регионально – осредненных аномалий годо-

вых и сезонных сумм прямой солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность по наблюдениям в 1961,5-2018,4 годы [18]: Прибайкалье и Забайкалье

(Srad.Baikal), Европейская часть России (Srad.Evropa), Приамурье и Приморье (Srad.Priamur_Primorje), Северо-Восток (Srad.Severo_Vostok), Средняя Сибрь (Srad.Sredn_Sibir), Западная Сибирь (Sras.Zapad_Sibir), лето (Srad.leto), весна (Srad.vesna), осень (Srad.oseny).

На рисунке 7 приведены графики вейвлетных фазовых характеристик группы переменных.

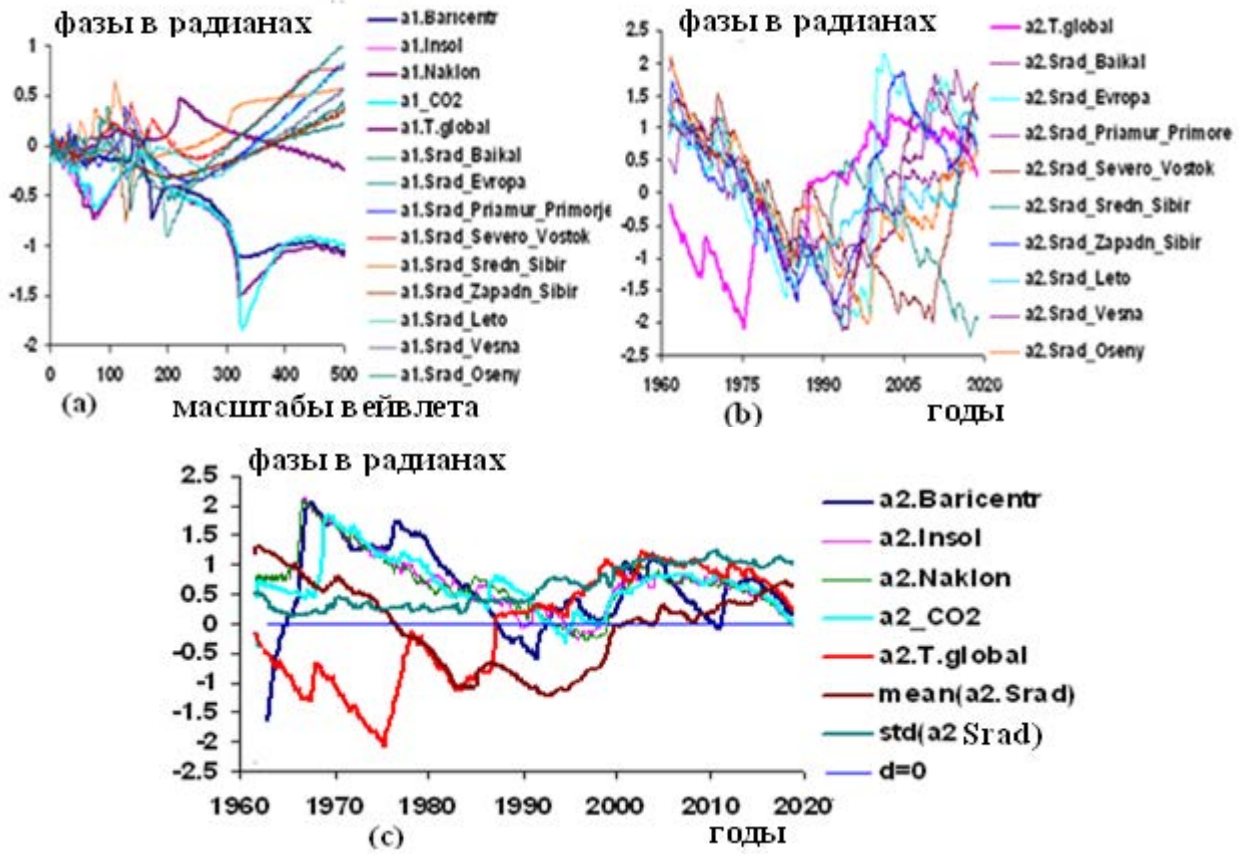


Рисунок 7. Графии изменений вейвлетных: (a) фазо-частотных характеристик гелиокосмических переменных (Baricentr, Insol, Naklon, CO_2), глобальной температуры (T.global) и регионально-осредненных аномалий (в процентах от среднего за 1961-1990 гг.), годовых и сезонных сумм прямой солнечной радиации (Srad), поступаюшей на горизонтальную поверхность, осредненные по территории РФ (Baikal, Evropa, Priamur_Primorje, Severo_Vostok, Sredn_Sibir, Zapad_Sibir, vesna, leto, oseny); (b) фазо-временных характеристик аномалий глобальной температуры и регионально-осредненных аномалий годовых и сезонных сумм прямой солнечной радиации; (c) фазо-временных характеристик гелиокосмических переменных, глобальной температуры, числовых характеристик среднего mean(a2.Srad) и стандартного отклонения std(a2.Srad) регионально-осредненных аномалий годовых и сезонных сумм прямой солнечной радиации по наблюдениям в 1961.5- 2018.4 годы

В исследованиях проявляются следующие закономерности: 1) на графиках (a) рисунка 7 вейвлетных частотных характеристик переменных наблюдается смещенность частот гелиокосмических переменных относительно изменений частот климатических переменных и изменений солнечной радиации в регионах и сезонных изменений в правую, в большую сторону; 2) в частотной области изменения регионально-осредненных аномалий годовых и сезонных сумм прямой солнечной радиации, существенно, с k = -0,51 (0,12), согласованы с изменениями гелиокосмических переменных, с k = ~ -0,36 (0,11) изменениями магнитных полей Солнца и Земли и разнонаправленно, с k = |0,05-0,88|, согласованы с изменениями климатических переменных с наибольшими влияниями глобальной температуры T.global и солнечных радиаций

Srad1, Srad2; во временной области изменения регионально-осредненных аномалий годовых и сезонных сумм прямой солнечной радиации согласованы с k = 0,32 (0,19), с изменениями гелиокосмических факторов и с k = |0,10-0,71|, с изменениями климатических факторов; 3) в изменении фазо-временных характеристик солнечной радиации в регионах и сезонных изменениях в интервале времени с 1961,5 по 1985 годы с равномерно убывающего режима, на графиках (b) рисунка 7, в последующие годы наблюдается режим разнонаправленного изменений переменных с изменением числовых характеристик (среднего и стандартного отклонения) их динамики, приведенных на графиках (c) рисунка 7; на графиках (b), с 1975,5 года, наблюдается перестройка изменений глобальной температуры к региональным и сезонным изменениям солнечной радиации, характеризующие переход изменений климата из одного режима в другой; 4) на графиках (b) рисунка 7 фазо-временных характеристик гелиокосмических, глиматических переменных и солнечной радиации в региональных и сезонных изменениях после 1985 года наблюдаются расходящиеся и сходящиеся изменения групп переменных, образуя решетчатую структуру, переходящая после 2016 года в однонаправленные изменения группы переменных.

Вейвлетный фазо-частотный и фазо-временной анализ относительных аномалий в % суммарных за год солнечного сияния в регионах и федеральных округах РФ по наблюдениям в 1961,9–2019,7 гг.

Исследованы группы гелиокосмических (Baricentr, Insol, Naklon, CO_2), климатических (T.global, Srad1, Srad2, TPO, TPV) переменных и изменений относительных аномалий суммарных за год продолжительности солнечного сияния (SSijan) [19], освещенности земной поверхности прямыми солнечными лучами, когда диск Солнца не закрыт плотными облаками: Центр и юг Восточной Сибири (Ssijn.CJV.Sibiry), Центр и юг Западной Сибири (Ssijn.CJZ.Sibiry), Чукотка и север Камчатки (Ssijn.Chuk.Sev.Kamchatky), Дальный Восток (Ssijn.Dalny.vostok), Юг ЕЧР (Ssijn.Jug,ECHP), Южный ФО (Ssijn.Jugn.FO), Приволжский ФО (Ssijn.Privolgsk.FO), Север ЕЧР и Западной Сибири (Ssijn.Sev.ECHP.Zap.Sibiry), Северная часть Восточной Сибири и Якутии (Ssijn.Sev.Vost.Sibiry.Jakuty). Северо-Кавказский ФО (Ssijn.Sev.Kavkaz.FO), Уральский ФО (Ssijn.Uralsk.FO), Северо-Западный ФО (Ssijn.Sev.Zapad.FO), Сибирский ФО (Ssijn.Sibirsk.FO), Центральный ФО (Ssijn.Centr.FO)

На графиках рисунка 8 представлены результаты исследований.

В вейвлетных фазовых откликов солнечных сияний на воздействия гелиокосмических и климатических переменных в наблюдаемом интервале времени обнаруживаются следующие закономерности; 1) в частотной области на изменчивость солнечного сияния значительны влияния гелиокосмических переменных с k = 0,95 (0,01), при этом влияния климатических переменных разнонаправленны и составляют k = |0,11-0,71| с наибольшими влияниями изменений TPV и Srad2; на графиках (a) рисунка 8 проявляются некоторые отличия откликов в смещении фаз солнечных сияний в регионах РФ при неизменных частотах на воздействия гелиокосмических переменных, 2) во временной области, на графиках (b) рисунка 8, на изменчивость солнечных сияний на территории РФ также наблюдается значительное влияние изменений гелиокосмиеских переменных: с k = 0,53 (0,02) влиянием барицентрических движений Солнца и с k = 0,93 (0,02), – влияниями многолетней солнечной инсоляции и угла наклона Земли, наблюдается несимметричность влияний гелиокосмических переменных; влияния изменений климатических переменных на изменчивость солнечного сияния разнонаправленны и составляют k = |0,31-0,64| с наибольшим влиянием Srad1; 3) на графиках (b) рисунка 8 фазо-временных характеристик изменений солнечных сияний проявляются их организованные, нестационарные взаимосогласованные изменения направлений движений в определенные годы, изменениями солнечной радиации с k = 0,50 (0,11); в последние десятилетия наблюдается усиление взаимосогласованных изменений солнечных сияний в регионах РФ, согласованные с изменениями гелиокосмических и климатических переменных, с изменениями парниковых газов, с изменени-

ями солнечных радиаций в регионах РФ, приведенные на графиках (c) рисунка 8; 4) изменения солнечных сияний в регионах РФ во временной области в наблюдаемом интервале времени, в 1961,9-2019.7 годы, значительно, с k =0,77 (0,17), согласованы с изменениями гелиокосмических переменных, с наибольшими влияниями многолетних инсоляций (Insol) и угла наклона Земли (Naklon) с k =0,93 (0,02); 5) на графиках (c) рисунка 8 отображаются коэффициенты согласованности изменений групп переменных во времени: геокосмических, климатических, солнечной радиации, приведенных на графиках (a) и (b) рисунка 7 и солнечных сияний, приведенных на графиках b рисунка 8 по наблюдениям в 1961,9-2018,7 гг. Графики (c) на рисунке 8 получены усреднением коэффициентов корреляций по наблюдениям 3 и 5 лет в скользящем режиме; графики циклические и содержат периоды в годах: 42,3, 21,4, 12,0 (0,8), 9,3 (1,3), 4,8 (0,8), 2,0 (0,5); они характеризуют циклическое усиление согласованностей изменений переменных в группах с меняющимися интенсивностями, и как видно, в последние десятилетия эти согласованные изменения, начиная с 2008 г., наибольшие с k =0,73; 6) на графиках (d) рисунка 7 отображаются фазовые траектории составляющих групп переменных, парниковых газов и глобальной температуры, которые из разнонаправленных «движений» до 2000 года переходят в согласованные однонаправленные изменения после 2000 года, согласованные с изменениями гелиокосмических переменных, барицентрических движений Солнца. Графики (d) на рисунке 8, фазовых характеристик группы переменных, состоят из трех условных частей: решетчатой разнонаправленной структуры, переходной составляющей и однонаправленных согласованных изменений с 2004 года. На графиках (d) рисунка 8 приводится график фазовых изменений разности a2.T.global-a2.CO_2 в наблюдаемом интервале времени, характеризующий динамику изменений сравниваемых переменных. В последнее десятилетие изменение этого графика характеризуется превышением роста приземной температуры a2.T.global рост парникового газа a2.CO_2, равнонаправленно изменяющейся с изменениями гелиокосмических переменных, a2.T.global и $a2.CO_2$, солнечных сияний и солнечных радиаций в регионах РФ.

Заметим, что аналогичные согласованные изменения фазовых характеристик переменных, характеризующих изменения процессов, происходящих на Солнце, наблюдаются на воздействия гелиокосмических факторов [3].

Графики (d) и (e) на рисунке 8 и все графики фазо-временных характеристик переменных, приведенных в статье, являются отражением свойства самоорганизации открытой климатической системы, в которой в сильно неравновесных условиях [42] могут спонтанно возникать переходы от беспорядка, «теплового хаоса», к упорядоченным состояниям [44-47], переходы случайных решетчатых структур, образованных фазовыми изменениями во времени гелиокосмических, климатических переменных, глобальной температуры и парниковых газов к однонаправленным согласованным изменениям этих же переменных, к усилению естественного парникового эффекта [37, 38] при взаимодействия парниковых газов и глобальной температуры с проявлениями глобального потепления.

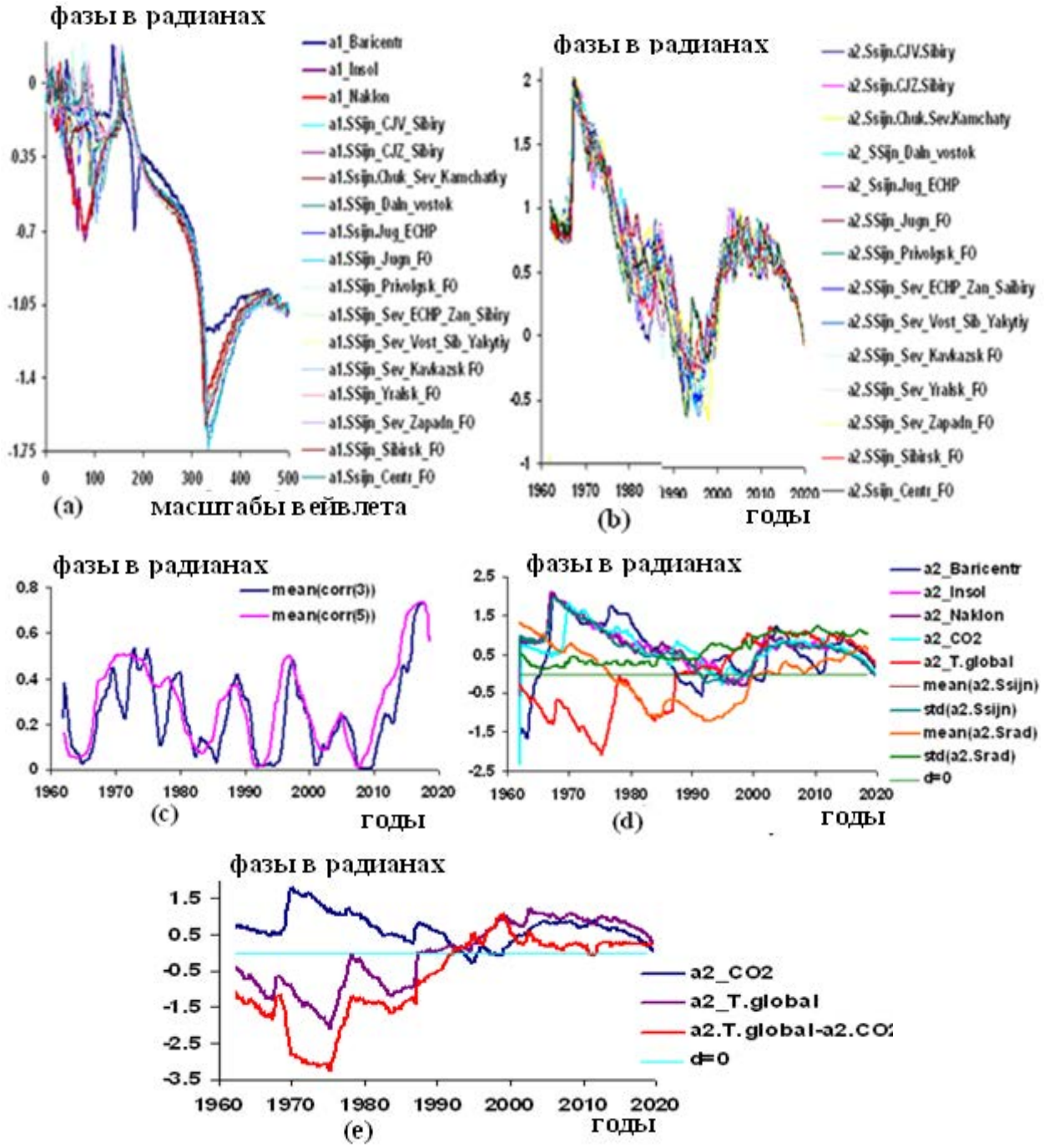


Рисунок 8. Графики изменений вейвлетных: (a) фазо-частотных гелиокосмических переменных (Baricentr, Insol, Naklon) и изменений солнечных сияний: Ssijn.CJV.Sibiry, Ssijn.CJZ.Sibiry, Ssijn.Chuk.Sev.Kamchatky, Ssijn.Dalny.vostok, Ssijn.Jug,ECHP, Ssijn.Jugn.FO, Ssijn.Privolgsk.FO, Ssijn.Sev.ECHP.Zap.Sibiry, Ssijn.Sev.Vost.Sibiry.Jakuty, Ssijn.Sev.Kavkazsk.FO, Ssijn.Uralsk.FO, Ssijn.Sev.Zapad.FO, Ssijn.Sibirsk.FO, Ssijn.Centr.FO; (b) фазо-временных характеристик изменений солнечных сияний: Ssijn.CJV.Sibiry, Ssijn.CJZ.Sibiry, Ssijn.Chuk.Sev.Kamchatky, Ssijn.Dalny.vostok, Ssijn.Jug,ECHP, Ssijn.Jugn.FO, Ssijn.Privolgsk.FO, Ssijn.Sev.ECHP.Zap.Sibiry, Ssijn.Sev.Vost.Sibiry.Jakuty, Ssijn.Sev.Kavkazsk.FO, Ssijn.Uralsk.FO, Ssijn.Sev.Zapad.FO, Ssijn.Sibirsk.FO, Ssijn.Centr.FO; (c) изменения коэффициента согласованности изменений гелиокосмических (Baricentr, Insol, Naklon, CO_2), климатических (T.global, Srad1, Srad2, TPO,TPV), солнечных радиаций и солнечных сияний в регинах РФ по наблюдениям в 1961,9-2018,7 гг: (d) графики изменений фазо-временных характеристик гелиокосмических переменных (Baricentr, Insol, Naklon, CO_2), глобальной температуры (T.global), числовых характеристик солнечного сияния и солнечной радиаци по регионам РФ: mean(a2.Ssijn), std(a2.Ssijn), mean(a2.Srad), std(a2.Srad); (e) графики изменений фазо-временных характеристик T.global, CO_2, T.global- CO_2 в интервале наблюдений 1961,9–2018 гг.

Выводы и заключение

Совместным анализом изменений гелиокосмических факторов, магнитных полей Солнца и Земли, географического и магнитных полюсов Земли, климатических переменных и температурных изменений в странах света и континентах с использованием непрерывного одномерного вейвлет-преобразования с вычислением фазо-частотных и фазо-временных характеристик переменных в выбранных интервалах времени установлены следующие закономерности:

1. В вейвлетной фазо-частотной области по силе влияния солнечного излучения, гелиокосмических переменных, изменяющиеся барицентрическими движениями Солнца, гравитационными силами, изменения температур, природных сред в странах и континентах, в частях света, разделяются на несколько классов: значительно, положительно и отрицательно согласованные с изменениями барицентрических движений Солнца, гелиокосмических переменных.
2. В вейвлетной фазо-частотной области наблюдается, что распределение регионов с аномально холодным и жарким климатом, положительно и отрицательно согласованные с изменения гелиокосмических переменных, значительно согласованы с распределением аномального магнитного поля Земли с полюсами в Канаде, Восточной Сибири (Якутии), Бразилии, Южной Америке и Африке, Антарктике, в странах Среднего и Ближнего Востока.
3. В вейвлетной фазо-частотной области наблюдается высокая согласованность изменений географического и магнитных полюсов Земли, изменений глобальной температуры, температуры в зоне 60-85° северной широты, в северном полушарии, в Арктике с изменениями магнитных полей Солнца и Земли, солнечного ветра, согласованные с изменениями барицентрических движений Солнца, гелиокосмических переменных, характеризующие рост влияний солнечной энергии и гравитационных сил в росте температуры в северном полушарии, в Арктике; наблюдается сравнительно низкое влияние изменений магнитных полей Солнца и Земли на изменение температуры в южном полушарии.
4. В анализах изменений температур воздуха в нижней стратосфере и тропосфере для сезонов Северного полушария на воздействия гелиокосмических переменных в частотной области наблюдается значительная согласованность с отрицательной направленностью изменений в стратосфере по сравнению с разнонаправленными и более слабыми изменениями в тропосфере; в частотной области влияния климатических переменных на изменчивость температур в нижней стратосфере и тропосфере различны и разнонаправлены с наибольшими влияниями солнечных радиаций Srad1, Srad2, TPO; во временной области наблюдается значительная разнонаправленная изменчивость температуры в нижней стратосфере изменениями климатических переменных по сравнению с влиянием гелиокосмических переменных.
5. В откликах температурных изменений в районах арктических морей и зонах Северного полушария, в полярной зоне на воздействия гелиокосмических и климатических переменных в частотной области наблюдаются высокие отрицательно направленные влияния гелиокосмических и разнонаправленные влияния изменений климатических переменных с наибольшими вкладами изменений глобальной температуры, солнечных радиаций Srad1, Srad2 и TPV; в частотной области изменений температурных переменных в арктических зонах и морей наблюдается их высокая взаимосогласованность с выраженными переходами к изменениям, согласованность и смещенность по частотам к изменениям гелиокосмических переменных.
6. В откликах изменений годовых сумм осадков в районах арктических морей в частотной области проявляется значительная положительно направленная изменчивость переменных на воздействия гелиокосмических факторов и разнонаправленная изменчивость на воздействия климатических переменных с наибольшими влияниями глобальной температуры и TPV; во временной области интенсивности влияний гелиокосмических и климатических переменных на изменчивость годовых сумм осадков в арктических зонах сохраняются; наблюдается частотная смещенность изменений годовых сумм осадков в арктических зонах к изменениям гелиокосмических переменных.

7. В откликах пространственно-осредненных годовых и сезонных сумм прямой солнечной радиации наблюдается смещенность частотных характеристик переменных относительно частотных характеристик гелиокосмических переменных; в частотной области наблюдается значительное, отрицательно направленное влияние изменений гелиокосмических факторов, магнитных полей Солнца и Земли и разнонаправленное влияние климатических факторов с наибольшими влияниями T.global, Srad1, Srad2 на изменчивость пространственно-осредненных годовых и сезонных сумм прямой солнечной радиации; на графиках фазо-временных характеристиках переменных наблюдается их перестройка, согласованная с изменениями барицентрических движений Солнца, перестройка изменений глобальной температуры к изменениям кривых солнечных радиаций.

8. В откликах относительных аномалий в % суммарных за год солнечных сияний в регионах и федеральных округах Российской Федерации на воздействия гелиокосмических переменных в частотной области наблюдается значительная положительно направленная изменчивость переменных и разнонаправленная изменчивость влияниями климатических переменных с меньшей интенсивностью с наибольшими влияниями TPV и Srad2; на графиках частотных характеристик солнечных сияний и гелиокосмических переменных наблюдается значительная согласованность изменений групп переменных; на графиках временных характеристик солнечных сияний наблюдается их значительная взаимосогласованнось, изменяющаяся во времени, обусловленная изменениями гелиокосмических переменных.

9. На графиках изменений фазо-временных характеристиках температурных переменных в современности в странах и континентах, в атмосфере, температур в арктических зонах Северного полушария, осадков в районах арктических морей, аномалий годовых сумм прямой солнечной радиации на территории России, солнечного сияния по территории России, гелиокосмических и климатических факторов, определяющих климат на Земле, отображаются разнонаправленно, хаотически изменяюшиеся фазовые структуры, переходящие в определенное время, в соответствии с изменениями барицентрических движений Солнца, в организованные однонаправленно изменяющиеся структуры, приводящие к усилению естественного парникового эффекта, усилению взаимодействия, генерации парниковых газов и приземной температуры в атмосфере.

10. Описанные в работе изменения фазовых характеристик гелиокосмических, включая и изменения магнитных полей Солнца и Земли, климатических переменных, определяющие динамику климата на Земле, являются отражением свойства самоорганизующейся сложной открытой климатической системы, Движущей силой в этой системе являются гравитационные силы взаимодействий планет солнечной системы с Солнцем и другими планетами, управляющие изменениями солнечной энергии, процессами, происходящими в Земле и параметрами движений Земли, планет солнечной системы.

Список литературы

1. Алексеев, В. И. Исследование изменений глобального климата как сложной системы с использованием вейвлетных фазо-частотных функций, фазо-частотных и фазо-временных характеристик гелиокосмических и климатических переменных. Часть 1 / В. И.Алексеев. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 7. – С. 238–250.

2. Алексеев, В. И. Исследование изменений глобального климата как сложной системы с использованием вейвлетных фазо-частотных функций, фазо-частотных и фазо-временных характеристик гелиокосмических и климатических переменных. Часть 2 / В. И.Алексеев. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 8. – С. 99–111.

3. Алексеев, В. И. Применение вейвлетного фазового метода исследований сигналов к анализу асимметричных барицентрических движений Солнца и изменений процессов, про-

исходящих на Солнце, околоземном пространстве и в недрах Земли / В. И. Алексеев. – Текст : непосредственный // Вестник Югорского университета. – 2020. – № 3 (58). – С. 7–35.

4. Long-term temperature record: Australian Climate Observations Reference Network – Surface Air Temperature // Australian Government. – 2018. – URL: http://www.bom.gov.au/climate/data/acorn-sat/ (date of application: 15.01.2022).

5. Global and European temperature // Europian Environment Agency. – 2012. – URL: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/global-and-european-temperature/global-and-european-temperature-assessment-1 (date of application: 15.01.2022).

6. Kozin, D. Russia's Leading Climate Change Expert Gives Sober Prognosis / D. Kozin // The Moskow Times. – 2021. – URL: https://www.themoscowtimes.com/2020/04/03/russias-leading-climate-change-expert-gives-sober-prognosis-a69822 (date of application: 15.01.2022).

7. Temperature in Polar regions: Arctic and Antarctic // Climate4yoy. – 2020. – URL: https://www.climate4you.com/Polar%20temperatures.htm#Diagram%20ArcticMAAT (date of application: 15.01.2022).

8. Toward a Resilient Canadian Agriculture and Argi-Food System: Adapting to Climate Change // House of commons Chambre des Communes. – 2020. – URL: https://www.ourcommons.ca/documentviewer/en/42-1/agri/report-11/page-30 (date of application: 15.01.2022).

9. Michaels, P. J. Greenland Melt 'Off the Chart? / P. J. Michales // Cato Institute. – 2018. – URL: https://www.cato.org/blog/greenland-melt-chart (date of application: 15.01.2022).

10. Climate Change and its Influence on Active Layer Depth in Central Yakutia / A. Desyatkin, P. Fedorov, N. Filippov, R. Desyatkin. – DOI: 10.3390/land1001003 // MDPI. – 2021. – URL: https://www.mdpi.com/2073-445X/10/3/htm (date of application: 15.01.2022).

11. Annual State of the Climate of South Africa // Weathersa. – 2019. – URL: https://www.weathersa.co.za/Documents/Corporate/Annual%20State%20of%20the%20Climate%202019.pdf (date of application: 15.01.2022).

12. Indian Cities Are Getting Hotter And 2015 Was The Hottest Year : NASA Reports // The Logical Indian. – 2016. – URL: https://thelogicalindian.com/others/mumbai-average-temperature-up-2-4-c-over-124-years/ (date of application: 15.01.2022).

13. Average annual temperature in the U.S. from 1895 to 2021 (In Fahrenheit) // Statista. – URL: https://www.statista.com./statistics/500472/annual-average-temperature-in-the-us/ (date of application: 15.01.2022).

14. Irland mean temperature // Ask about Ireland. – 2013. – URL: https://www.askaboutireland.ie/learning-zone/secondary-students/cspe/stewardship/Change/climate-change/our-changing-climate/ (date of application: 15.01.2022).

15. Müller, G. V. Observed and Projected Changes in Temperature and Precipitation in the Core Crop Region of the Humid Pampa, Argentina / G. V. Müller, M. A. Lovino, L. C. Sgroi. – DOI: 10.3390/cli9030040 // *Climate*. – 2021. – Vol. *9* (3). – P. 40. – URL: https://www.mdpi.com/journal/climate (date of application: 15.01.2022).

16. Comparative Analysis of China Surface Air Temperature Series for the Past 100 Years / L. Zhang, H. Liu, Y. Ding [et al.] // ScienceDirect. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674927810500029 (date of application: 15.01.2022).

17. The Discovery of Global Warming // AIP. – 2021. – URL: https://history.aip.org/climate/20ctrend.htm (date of application: 15.01.2022).

18. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. – Москва : Росгидромет, 2021. – 104 с. – Текст : непосредственный.

19. Dickey, J .O. Earth rotation / J .O. Dickey // Global Earth Physics: a handbook of physical constants American Geophysical Union / ed. by T. J.Ahrens. –Washington : American Geophysical Union, 1995. – P. 356–368.

20. Earthquare Statistics // BGR. – 2018. – URL: https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Seismologie/Seismologie/Erdbebenstatistik/erdbebenstatistik_node_en.htm (date of application: 15.01.2022).

21. New studies confirm weakening of the Gulf Stream circulation (AMOC) // RealClimate. – 2020. – URL: https://www.realclimate.org/index.php/archives/2020/09/new-studies-confirm-weakening-of-the-gulf-stream-circulation-amoc/ (date of application: 15.01.2022).

22. Climate variability: the example of the North Atlantic Oscillation // Encyclopedia of the Environment. – 2019. – URL: https://www.encyclopedie-environnement.org/en/climate/climate-variability-example-north-atlantic-oscillation/ (date of application: 15.01.2022).

23. Охлопков, В. П. Основные периодичности движения Солнца относительно центра масс солнечной системы и солнечная активность / В. П. Охлопков. – Текст : непосредственный // Вестник московского университета (ВМУ). Серия Физика. Астрономия. – 2011. – № 6. – С. 138–142.

24. Большаков, В. А. Новая концепция орбитальной теории палеоклимата / В. А. Большаков. – Москва : МГУ, 2003. – 256 с. – Текст : непосредственный.

25. Zerbo, J.-L. Geomagnetism during solar cycle 23: Characteristics / J.-L. Zerbo, Ch. Amory-Mazaudier, F. Ouattara // ScienceDirect. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090123212000689 (date of application: 15.01.2022).

26. Бялко, А. В. Палеоклимат: дополнения к теории Миланковича / А. В. Бялко. – Текст : непосредственный // Природа. – 2009. – № 12. – С. 18–28.

27. Climate change is making UAE hotter – a trend that will continue // UAE. – 2021. – URL: https://www.thenationalnews.com/uae/environment/climate-change-is-making-uae-hotter-a-trend-that-will-continue-1.1249027 (date of application: 15.01.2022).

28. Temperature Bar Chart Middle // Wikimedia commons. – 2021. – URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Temperature_Bar_Chart_Middle_East-Iraq--1901-2020-2021-07-13.png (date of application: 15.01.2022).

29. On September 13, 1922, Al Aziziyah, in Libya, reported the highest temperature ever recorded. According to their claims, how hot did it get that day? // Quora. – 2022. – URL: https://www.quora.com/On-September-13-1922-Al-Aziziyah-in-Libya-reported-the-highest-temperature-ever-recorded-According-to-their-claims-how-hot-did-it-get-that-day (date of application: 15.01.2022).

30. LaFond, K. Infographic: Syria Drought and Climate Change / K. LaFond // Circle of blue. – 2016. – URL: https://www.circleofblue.org/2016/middle-east/infographic/ (date of application: 15.01.2022).

31. Glausiusz, L. Discounting Climate Change in Israel / L. Glausiusz // The Themes of Israel. – 2020. – URL: https://blogs.timesofisrael.com/discounting-climate change-in-israel/ (date of application: 15.01.2022).

32. Climate change and human health: Spatial modeling of water availability, malnutrition, and livelihoods in Mali, Africa / M. M. Jankowska, D. Loper-Carr, C. Funk [et al] // Semantic Scholar. – 2012. – URL: https://www.semanticscholar.org/paper/Climate-change-and-human-health%3A-Spatial-modeling-Jankowska-L%C3%B3pez-Carr/cb1ede511166f98d92e0775e97904b3732a08a6c (date of application: 15.01.2022).

33. Jonson, S. K. Hurricane Harvey was fueled by record heat in the Gulf of Mexico / S. K. Jonson // ARSTechnica. – 2018. – URL: https://arstechnica.com/science/2018/05/hurricane-harvey-was-fueled-by-record-heat-in-the-gulf-of-mexico/ (date of application: 15.01.2022).

34. Kahn, B. Of Brazil, the World Cup and Climate Change / B. Kahn // Climate Central. – 2014. – URL: https://www.climatecentral.org/news/brazil-world-cup-climate-change-17542 (date of application: 15.01.2022).

35. Богатырева, М. А. Проявление современных изменений климата на территории Курской области / М. А. Богатырева. – Текст : электронный // Центральный научный вестник. – 2013. – URL: http://cscb.su/n/011601/011601017.htm (дата обращения: 15.01.2022).

36. Owens, M. J. Global solar wind variations over the last four centuries / M. J. Owens, M. Lockwood, P. Riley // Scientific reports. – 2017. – URL: https://www.nature.com/articles/srep41548 (date of application: 15.01.2022).

37. Семенов, С. М. Парниковый эффект: Открытие, развитие, концепции, роль в формировании глобального климата и его антропогенных изменений / С. М. Семенов. – Текст : электронный // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2015. – № 2. – С. 103–124. URL: http://downloads.igce.ru/journals/FAC/FAC2015/FAC20152/SemenovSMFAC2015N204122015.pdf (дата обращения: 15.01.2022).

38. Webster, B. Theory of 'Greenhouse Effect' Of Sun's Rays Is Challenged / B. Webster // The New York Times Archives. – 1975. – № 3. – URL: https://www.nytimes.com/1975/11/03/archives/theory-of-greenhouse-effect-of-suns-rays-is-challenged.html#:~:text=The%20generally%20accepted%20%E2%80%9Cgreenhouse%E2%80%9D%20theory,in%2C%20keeping%20the%20planet%20comfortable. (date of application: 15.01.2022).

39. Svalgaard, L. Prediction of Solar Cycle 25 / L. Svalgaard // LASP. – 2020. – URL: http://lasp.colorado.edu/media/projects/SORCE/meetings/2018/final/OralPDFs/54Svalgaard.pdf (date of application: 15.01.2022).

40. Ерашов, В. М. Магнитное поле влияет на скорость вращения Земли / В. М. Ерашов. – Текст : электронный // Кубрик. – URL:http://www.randewy.ru/gml/erashov63.html (дата обращения: 15.01.2022).

41. Кокоуров, В. Д. Многолетние изменения в системе Солнце-Земля / В. Д. Кокоуров. – Текст : электронный // Солнечно-Земная физика. ИСЗФ. СО РАН. – 2016. – URL: http://space.msu.ru/irkutsk/kok/changes.htm (дата обращения: 15.01.2022).

42. Alken, P. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation / P. Alken, E. Thébault, B. Zhou // Springer Open. – 2021. – URL: https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-020-01288-x (date of application: 15.01.2022).

43. Dickey, J. O. Earth rotation / J. O. Dickey // Global Earth Physics: a handbook of physical constants American Geophysical Union / ed. by T. J. Ahrens. – Washinton American Gophisical Union, 2020. – P. 356–368.

44. Еськов, К. Ю. Удивительная палеонтология. История Земли и жизни на ней / К. Ю. Еськов. – Москва : ЭНАС-КНИГА, 2017. – 320 с. – Текст : непосредственный.

45. Nicolis, G. Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations / G. Nicolis, I. Prigogine. – New York : Wiley, 1977. – 491 p.

46. Алдонин, А. Структурный анализ самоорганизующихся систем : монография / А. Алдонин ; Сибирский федеральный университет. – Красноярск, 2019. – 344 с. – URL: https://www.litres.ru/gennady-alonin/strukturnyy-analiz-samoorganizuschissya-sistem-40133576/ (дата обращения: 15.01.2022). – Текст : электронный.

47. Cassani, A. Belousov-Zhabotinsky Type reactions^the non-linear behavior of chemical systems / A. Cassani, A. Monteverde, M. Pimetti // Journal of mathematical chemistry. – 2021. – Vol. 59. – P. 792–826.

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 г. Выпуск 1 (64). С. 101–117

УДК 519.63:532.517
DOI: 10.18822/byusu202201101-117

О НЕКОТОРЫХ КЛАССАХ СТАЦИОНАРНЫХ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА

Пятков Сергей Григорьевич
доктор физико-метаметических наук,
профессор кафедры цифровых технологий
Института цифровой экономики
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»,
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: pyatkov@math.nsc.ru

Белоногов Владимир Андреевич
аспирант Института цифровой экономики,
начальник отдела информационных систем
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»,
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: vladimir.belonogow@yandex.ru

В работе рассматривается вопрос о корректности в пространствах Соболева стационарных обратных задач определения коэффициента теплообмена на границе раздела сред, входящего в условие сопряжения типа неидеального контакта. Доказана теорема существования и единственности решений. Метод является конструктивным, и на основе предложенного подхода возможно построение численных алгоритмов решения задачи. Доказательство основано на получаемых априорных оценках и теореме о неподвижной точке.

Ключевые слова: обратная задача, задача сопряжения, коэффициент теплопередачи, параболическое уравнение, тепломассоперенос.

ON SOME CLASSES OF STATIONARY INVERSE PROBLEMS OF DETERMINING THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT FOR MATHEMATICAL MODELS OF HEAT AND MASS TRANSFER

Sergey G. Pyatkov
Doctor of Physical and Metametical Sciences,
Professor of the Department of Digital Technologies,
Institute of Digital Economy
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: pyatkov@math.nsc.ru

Vladimir A. Belonogov
Postgraduate Student of the Institute of Digital Economy,
Head of Information Systems Department,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: vladimir.belonogow@yandex.ru

In the article we consider well-posedness in Sobolev spaces of stationary inverse problems of recovering the heat transfer coefficient at the interface which is included in the transmission condition of the imperfect contact type. The existence and uniqueness theorem are exhibited. The method is constructive and the approach allows to develop numerical methods for solving the problem. The proof relies on a priori estimates obtained and the fixed-point theorem.

Keywords: inverse problem, transmission problem, heat transfer coefficient, parabolic equation, heat and mass transfer.

Введение

Мы исследуем обратные задачи определения коэффициентов теплообмена, входящих в условие сопряжения в стационарном случае. Рассматривается эллиптическое уравнение вида

$$-Lu = f(x), Lu = \sum_{i,j=1}^{n} a_{ij}(x)u_{x_i x_j} + \sum_{i=1}^{n} a_i(x)u_{x_i} + a_0(x)u - \lambda u, \quad (1)$$

где $x \in G \subset \mathbb{R}^n$ – ограниченная область с границей Γ и $\lambda \in \mathbb{R}$. Считаем, что область G разделена на две области G^+ и G^- такие, что $\overline{G^-} \subset G$, $\overline{G^+} \cup \overline{G^-} = \overline{G}, G^+ \cap G^- = \emptyset$. Положим, $\Gamma_0 = \partial G^+ \cap \partial G^-$. Уравнение (1) дополняется краевыми условиями:

$$Bu|_\Gamma = g, \quad (2)$$

где $Bu = u$ или $Bu = \sum_{i,j=1}^{n} a_{ij}(x)n_j \frac{\partial u}{\partial x_i} + \sigma(x)u$, и условиями сопряжения

$$\frac{\partial u^+}{\partial N}(x_0) - \beta(u^+ - u^-)(x_0) = g^+(x_0), \frac{\partial u^+}{\partial N}(x_0) = \frac{\partial u^-}{\partial N}(x_0), x_0 \in \Gamma_0, \quad (3)$$

где $\frac{\partial u^\pm}{\partial N}(x_0) = \lim_{x \in G^\pm, x \to x_0 \in \Gamma_0} \sum_{i,j=1}^{n} a_{ij}(x)u_{x_i}\nu_j$, $u^\pm = \lim_{x \in G^\pm, x \to x_0 \in \Gamma_0} u(x)$ и n, ν – внешние единичные нормали к $\Gamma, \partial G^-$ соответственно. К условиям сопряжения мы добавляем условия переопределения вида

$$u^+(b_i) = \psi_i \ (i = 1,2, \dots, r_1), u^-(b_i) = \psi_i \ (i = r_1 + 1, \dots, r), \quad (4)$$

где $b_i \in \Gamma_0 \ (i = 1,2, \dots, r)$ и ψ_i некоторые постоянные.

Задача состоит в нахождении решения уравнения (1), удовлетворяющего условиям (2)-(4) и неизвестной функции β вида $\beta = \sum_{j=1}^{r} \beta_j \Phi_j(x)$, где функции Φ_j заданы, а постоянные β_j считаются неизвестными. Условия сопряжения (3) совпадают с известными в теории тепломассопереноса условиями на границе двух сред, когда контакт не является идеальным (см. постановки в [1]). В этом случае β – коэффициент теплообмена. Если $\beta \to \infty$, мы получим стандартную постановку задачи дифракции (см. [2, § 16, гл. 3]), когда условия имеют вид $u^+ = u^-$, $\frac{\partial u^+}{\partial N}|_{\Gamma_0} = \frac{\partial u^-}{\partial N}|_{\Gamma_0}$. Обратные задачи нахождения неизвестных граничных режимов, в частности задачи конвективного теплообмена, являются классическими (см. [4]-[5]). В настоящее время имеется большое количество работ, посвященных численному решению задач типа (1)-(4) в различных постановках, точки $\{b_i\}$ в (4) чаще всего являются внутренними точками областей G^+, G^-. Отметим, например, работы [6-9], посвященные задачам сопряжения с условиями типа неидеального контакта в стационарном случае, и работы [10-13]. Гораздо большее количество работ посвящено задачам (1)-(4) в нестационарном случае, в том числе и решению обратных задач (1)-(4) (см. [10]-[13]). С теоретической точки зрения задача сопряжения (1)-(3) исследована только в некоторых частных случаях, а обратная задача (1)-(4) практически не исследовалась. Ранее в основном исследовались задачи сопряжения с условиями типа дифракции. Можно отметить классические работы (L_2 теория) О. А. Ладыженской и О. А. Олейник (см. [14-17]) и ряда других авторов в 50-60-е годы. Общая теория задач типа дифракции для эллиптических операторов высокого порядка имеется в работах Шефтеля [18, 19], где приведены условия разрешимости как в пространствах Соболева, так и в пространствах Гельдера. Можно также

отметить работу [20], где по существу был рассмотрен вопрос об обобщенной в некотором смысле разрешимости задач типа дифракции, и работу [21], посвященную уже задачам типа дифракции для эллиптических систем высокого порядка в пространствах Соболева и Гельдера. Среди работ, посвященных задаче (1)-(3), нет достаточно общих результатов. Можно отметить работы [22-24], где, в частности, получены теоремы существования и единственности решения в пространстве $W_2^2(G^+) \cap W_2^2(G^-)$ в цилиндрической пространственной области в модельном случае.

В данной работе мы изучаем вопросы корректности задачи (1)-(4), в частности, мы получим теоремы существования и единственности решений (основной результат – теорема 3).

Определения и вспомогательные результаты

В работе мы используем пространства Соболева и Гельдера $W_p^s(G)$, $C^\alpha(\overline{G})$ (см. определения в [25]). Под нормой вектора понимаем сумму норм координат. Пусть $(u, v) = \int_G u(x)\overline{v(x)}dx$. Обозначим через $B_\delta(b_i)$ – шар радиуса δ с центром в точке b_i. Параметр $\delta > 0$ назовем допустимым, если $\overline{B_\delta(b_i)} \cap \partial G = \emptyset$, $\overline{B_\delta(b_i)} \cap \overline{B_\delta(b_j)}) = \emptyset$ для $i \neq j$. Далее во всех условиях на данные считаем такой параметр фиксированным.

Далее мы считаем, что параметр $p > n$ зафиксирован. Говорим, что граница Γ данной области G принадлежит классу C^s, $s \geq 1$ (см. определение в [2, Гл. 1]), если для любой точки $x_0 \in \Gamma$ найдется окрестность U (координатная окрестность) этой точки, и система координат y (локальная система координат), полученная с помощью поворота и переноса начала координат из исходной, такая, что ось y_n направлена по внутренней нормали в Γ в точке x_0, и уравнение части границы $U \cap \Gamma$ имеет вид $y_n = \gamma(y')$, $\gamma(0) = 0$, $|y'| < \delta$, $y' = (y_1, \dots, y_{n-1})$, причем $\gamma \in C^s(\overline{B_\delta{}'(0)})$ $(B_\delta{}'(0) = \{y' : |y'| < \delta\})$ и $G \cap U = \{y : |y'| < \delta, 0 < y_n - \gamma(y') < \delta_1\}$, $(\mathbb{R}^n \backslash G) \cap U = \{y : |y'| < \delta, -\delta_1 < y_n - \gamma(y') < 0\}$. Числа δ, δ_1 для области G фиксированы, причем без ограничения общности считаем, что $\delta_1 > (M+1)\delta$, где M – постоянная Липшица функции γ. Обозначим параметр δ из этого определения через δ_G.

Введём обозначения: $G_\delta = \cup_i B_\delta(b_i)$, $\Gamma_\delta = G_\delta \cap \Gamma_0$. Рассматривая задачу (1)-(4), мы предполагаем, что

$$\Gamma, \Gamma_0 \in C^2, \Gamma_\delta \in C^3, \tag{5}$$

где δ – допустимый параметр такой, что $\delta < \delta_G$-, и для любой координатной окрестности $U_i = \{y : |y'| < \delta, -\delta_1 < y_n - \gamma(y') < \delta_1\}$ точки b_i имеем, что $\overline{U_i} \subset G$. Чтобы достичь последнего, мы всегда можем уменьшить параметр δ. Условие $\delta_1 > (M+1)\delta$ гарантирует вложение $B_\delta(b_i) \subset U_i$. Далее мы фиксируем такой параметр δ (он может быть выбран как угодно малым, если необходимо). Следующие оценки следствия стандартных теорем о следах [25] и определений норм.

Лемма 1. Пусть G – ограниченная область с границей класса C^2. Существует постоянная C такая, что

$$\| v \|_{\widetilde{W}_p^{2s_1}(\Gamma)} + \| \frac{\partial v}{\partial \nu} \|_{\widetilde{W}_p^{2s_0}(\Gamma)} \leq C \| v \|_{W_p^2(G)}, s_0 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2p}, s_1 = 1 - \frac{1}{2p}, \tag{6}$$

для всех $v \in W_p^2(G)$. Здесь $\frac{\partial v}{\partial \nu}$ – производная по внешней нормали к Γ.

Лемма 2. Пусть $s \in (n/p, 1)$ и G – область, удовлетворяющая условиям леммы 1. Тогда справедливы следующие утверждения. Произведение qv функций класса $W_p^s(G)$ снова принадлежит $W_p^s(G)$, и справедлива оценка

$$\| qv \|_{W_p^s(G)} \leq c_0 \| q \|_{W_p^s(G)} \| v \|_{W_p^s(G)}.$$

Аналогичное утверждение справедливо и для функций класса $W_p^s(\Gamma_0)$ при $s \in ((n-1)/p, 1)$.

Оператор L считается эллиптическим, т. е. для некоторой постоянной $\delta_0 > 0$ выполнено неравенство

$$\sum_{i,j=1}^{n} a_{ij}(x)\xi_i\xi_j \geq \delta_0|\xi|^2 \ \forall \xi \in \mathbb{R}^n, \forall x \in G.$$

Рассмотрим вспомогательные задачи сопряжения

$$Lu = f(x), x \in G, Bu|_\Gamma = g, \tag{7}$$

$$B^+u = \frac{\partial u^+}{\partial N} - \beta(u^+ - u^-) = g^+, \frac{\partial u^+}{\partial N} = \frac{\partial u^-}{\partial N} + g^-, x \in \Gamma_0. \tag{8}$$

Опишем условия на данные, гарантирующие разрешимость задачи (7), (8). Считаем, что

$$a_i \in L_p(G)\ (i \geq 0), a_{ij} \in C(G^\pm)\ (\ i,j = 1, \dots, n), \sigma \in C^{s_0+\varepsilon_0, 2s_0+2\varepsilon_0}(\Gamma); \tag{9}$$

функции $a_{ij}|_{G^\pm}$ допускают продолжение до непрерывных функций класса $C(\overline{G^\pm})$ и

$$a_{ij}^\pm|_{\Gamma_0} \in C^{s_0+\varepsilon_0, 2s_0+2\varepsilon_0}(\overline{\Gamma_0}), a_{ij}|_\Gamma \in C^{s_0+\varepsilon_0, 2s_0+2\varepsilon_0}(\overline{\Gamma}), i,j = 1, \dots, n, \tag{10}$$

где $a_{ij}^\pm(t, x_0) = \lim_{x \in G^\pm, x \to x_0 \in \Gamma_0} a_{ij}(t,x)$, параметр $\varepsilon_0 \in (0, \frac{1}{2})$ произволен (он может быть как угодно мал), и последнее включение в (10) считается выполненным, только если $Bu \neq u$ в (2);

$$a_i \in W_p^1(G_\delta^\pm))\ (i \geq 0), a_{ij} \in W_\infty^1(G_\delta^\pm))(i,j = 1,2, \dots, n), \tag{11}$$

где $G_\delta^\pm = G_\delta \cap G^\pm$. Построим функции $\varphi_i(x) \in C_0^\infty(\mathbb{R}^n)$ такие, что $\varphi_i(x) = 1$ в $B_{\delta/2}(b_i)$ и $\varphi_i(x) = 0$ в $\mathbb{R}^n \backslash B_{3\delta/4}(b_i)$, положим $\varphi(x) = \sum_{i=1}^r \varphi_i(x)$.

Мы используем выпрямление границы $z_n = y_n - \gamma(y')$, $z' = y'$, где $y-$ локальная система координат в точке b_i. При выполнении условия (5) преобразование $x = x(y(z)) = x^i(z)$ и обратное к нему принадлежат классу C^3. Для удобства всюду ниже считаем, что на Γ_0 ось y_n локальной системы координат в каждой точке направлена вне области G^-. Пусть $U' = \{z: |z'| < \delta, -\delta_1 < z_n < \delta_1\}$, $U^{+(-)} = \{z \in U': z_n > 0 (z_n < 0)\}$ и $B_\delta{}' = \{z': |z'| < \delta\}$.

Мы считаем, что

$$g^\pm \in W_p^{2s_0}(\Gamma_0), g \in W_p^{2k_0}(S), \tag{12}$$

где $k_0 = s_0$ в случае условий третьей краевой задачи и $k_0 = s_1$ в случае условий Дирихле. Пусть

$$f \in L_p(G), \beta \in W_p^{2s_0}(\Gamma_0), \tag{13}$$

$$\beta \in W_p^{2-1/p}(\Gamma_\delta). \tag{14}$$

В координатной окрестности U_i точки $b_i \in \Gamma_0$ выпрямим границу и перейдем к системе координат $z = (z', z_n)$. Мы также предполагаем, что для каждого $i = 1,2, \dots, r$

$$\begin{aligned} &\nabla_{z'}\varphi_i f(x^i(z)) \in L_p(U'), \nabla_{z'}\varphi_i u_0^\pm(x^i(z)) \in W_p^{2-2/p}(U^\pm)\ (i \leq r), \\ &\nabla_{z'}\varphi_i g^+(x^i(z',0)) \in W_p^{2s_0}(B_\delta{}'), \\ &\nabla_{z'}a_{kl}^\pm(x^i(z',0)) \in C^{s_0+\varepsilon_0, 2s_0+2\varepsilon_0}(B_\delta{}'), (k,l = 1,2 \dots, n, \varepsilon_0 > 0). \end{aligned} \tag{15}$$

Отметим, что условие (15) не зависит от введённой локальной системы координат y и системы координат z. Например, третье включение эквивалентно тому, что для любого гладкого касательного к Γ_0 векторного поля $l(x)$, $\frac{\partial \varphi_i g^+(x)}{\partial l} \in W_p^{2s_0}(B_\delta')$ каждая из производных $\frac{\partial}{\partial z_j}$ $(j = 1,2, \dots, n-1)$ в переменных x может быть записана как производная по направлению некоторого касательного к Γ_0 векторного поля, которые в каждой точке образуют базис в касательной плоскости к Γ_0. Условие (15) может быть переформулировано и в исходной системе координат x, однако гораздо проще записать его в виде (15).

Следующий результат фактически есть следствие теоремы 3 в [26], где эта теорема была доказана в параболическом случае.

Теорема 1. *Пусть выполнены условия* (9)-(10), (12)-(13) *и* $\Gamma, \Gamma_0 \in C^2$. *Тогда найдется параметр* $\lambda_0 > 0$ *такой, что при* $\lambda \geq \lambda_0$ *существует единственное решение задачи* (7)-(8) *такое, что* $u \in W_p^{1,2}(G^+) \cap W_p^{1,2}(G^-)$, *причем справедлива оценка*

$$\| u \|_{W_p^2(G^+)} + \| u \|_{W_p^2(G^-)} + |\lambda| \| u \|_{L_p(G)} \leq C_0(\| f \|_{L_p(G)} + \| g^+ \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \| g^+ \|_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0}$$
$$+ \| g^- \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \| g^- \|_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0} + \| g \|_{W_p^{2k_0}(\Gamma)} + |\lambda|^{k_0} \| g \|_{L_p(\Gamma)}).$$

Доказательство. Наше утверждение фактически вытекает из соответствующей теоремы для параболического случая (см. теорему 3 в [26]). По сравнению с [26], здесь мы описываем гладкость функции β в терминах принадлежности некоторому пространству Соболева. Условия такого типа на коэффициенты граничных операторов (как и в нашем случае) использовались (см., например, [27]). Получим априорную оценку для решений. Положим, $v = e^{\lambda t}u(x)$, где u –решение задачи (7), (8). Эта функция есть решение задачи

$$v_t - Lv = f(x)e^{\lambda t}, (t,x) \in Q = (0,T) \times G, T > 0,$$
$$Bv|_S = ge^{\lambda t}\ (S = \Gamma \times (0,T)), v|_{t=0} = u(x),$$
$$\frac{\partial v^+}{\partial N}(x) - \beta(v^+ - v^-)(x) = g^+(x)e^{\lambda t}, \frac{\partial v^+}{\partial N}(x) = \frac{\partial v^-}{\partial N}(x) + g^-(x)e^{\lambda t}, (t,x) \in S_0 = (0,T) \times \Gamma_0.$$

Решение этой задачи существует, единственно, и решение удовлетворяет оценке

$$\| v_t \|_{L_p(Q)} + \| v \|_{L_p(0,T;W_p^2(G^+))} + \| v \|_{L_p(0,T;W_p^2(G^-))} \leq C_1(\| fe^{\lambda t} \|_{L_p(Q)} +$$
$$\| g^+e^{\lambda t} \|_{W_p^{s_0,2s_0}((0,T)\times\Gamma_0)} + \| ge^{\lambda t} \|_{W_p^{k_0,2k_0}((0,T)\times\Gamma)} +$$
$$\| g^-e^{\lambda t} \|_{W_p^{s_0,2s_0}((0,T)\times\Gamma_0)} + \| u \|_{W_p^{2-2/p}(G^+)} + \| u \|_{W_p^{2-2/p}(G^-)}),$$

где C_1 – некоторая постоянная, не зависящая от данных. Рассмотрим, например, норму

$$\| g^+e^{\lambda t} \|_{W_p^{s_0,2s_0}((0,T)\times\Gamma_0)} = (\| g^+e^{\lambda t} \|^p_{L_p(0,T;W_p^{2s_0}((0,T)\times\Gamma_0))} + \| g^+e^{\lambda t} \|^p_{L_p(\Gamma_0;W_p^{s_0}(0,T))})^{1/p},$$

где каждая норма в правой и левой части распадается в произведение норм по переменным t, x. Фиксируем $\lambda_0 > 0$, и пусть $\lambda \geq \lambda_0$. Например, имеем неравенство

$$\| e^{\lambda t} \|_{W_p^{s_0}(0,T)} \leq c \| e^{\lambda t} \|^{s_0}_{W_p^1(0,T)} \| e^{\lambda t} \|^{1-s_0}_{L_p(0,T)} \leq c_1|\lambda|^{s_0}C(T,\lambda), C(T,\lambda) = ((e^{p\lambda T} - 1)/p\lambda)^{1/p},$$

откуда вытекает, что

$$(\| g^+e^{\lambda t} \|^p_{L_p\left(0,T;W_p^{2s_0}(\Gamma_0)\right)} + \| g^+e^{\lambda t} \|^p_{L_p\left(\Gamma_0;W_p^{s_0}(0,T)\right)})^{\frac{1}{p}} \leq$$
$$C(T,\lambda)c_2(\| g^+ \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \| g^+ \|_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0}),$$

где постоянная c_2 не зависит от λ. Аналогичные рассуждения могут быть записаны и для остальных интегралов. Таким образом, используя определение нормы и структуру решения v, получим неравенство

$$C(T,\lambda)(|\lambda| \| u \|_{L_p(G)} + \| u \|_{W_p^2(G^-)} + \| u \|_{W_p^2(G^+)}) \leq C_2C(T,\lambda)(\| f \|_{L_p(G)} + \| g^+ \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)}$$
$$+ \| g^+ \|_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0} + \| g^- \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)}$$
$$+ \| g^- \|_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0} + \| g \|_{W_p^{2k_0}(\Gamma)} + \left|\lambda|^{k_0} \| g \|_{L_p(\Gamma)}\right) + C_1\left(\| u \|_{W_p^2(G^+)} + \| u \|_{W_p^2(G^-)}\right).$$

Делим обе части неравенства на $C(T,\lambda)$. Увеличивая постоянную λ_0, если необходимо, мы можем считать, что $C_1/C(T,\lambda) \leq 1/2$ при $\lambda \geq \lambda_0$. Тогда будет справедливо неравенство

$$|\lambda| \parallel u \parallel_{L_p(G)} + \parallel u \parallel_{W_p^2(G^-)} + \parallel u \parallel_{W_p^2(G^+)} \le C_3(\parallel f \parallel_{L_p(G)} + \parallel g^+ \parallel_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} +$$
$$\parallel g^+ \parallel_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0} + \parallel g^- \parallel_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \parallel g^- \parallel_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0} + \parallel g \parallel_{W_p^{2k_0}(\Gamma)} + |\lambda|^{k_0} \parallel g \parallel_{L_p(\Gamma)}),$$

где постоянная C_3 не зависит от λ. Эта априорная оценка, как и в доказательстве теоремы 3 в [26], и метод продолжения по параметру в соответствии со схемой, изложенной в [26], гарантирует разрешимость задачи в требуемом классе и соответствующую оценку для решений из утверждения теоремы.

Оценку из утверждения теоремы можно улучшить в следующем смысле. Построим функцию $\varphi_{0i} \in C_0^\infty(\mathbb{R}^n)$ такую, что $supp\ \varphi_{0i} \subset B_\delta(b_i)$.

Лемма 3. *Пусть выполнены условия теоремы 1 и* $\lambda \ge \lambda_0 > 0$. *Тогда справедлива оценка*

$$\parallel \varphi_{0i}u \parallel_{W_p^2(G^+)} + \parallel \varphi_{0i}u \parallel_{W_p^2(G^-)} + |\lambda| \parallel \varphi_{0i}u \parallel_{L_p(G)} \le C_0(\parallel \varphi_{0i}f \parallel_{L_p(G)} + \parallel \varphi_{0i}g^+ \parallel_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} +$$
$$\parallel \varphi_{0i}g^+ \parallel_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0} + \parallel \varphi_{0i}g^- \parallel_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \parallel \varphi_{0i}g^- \parallel_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0} + |\lambda|^{-1/2+\varepsilon_0} J),$$
$$J = \parallel g \parallel_{W_p^{2k_0}(\Gamma)} + |\lambda|^{k_0} \parallel g \parallel_{L_p(\Gamma)} + \parallel f \parallel_{L_p(G)} + \parallel g^+ \parallel_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} +$$
$$\parallel g^+ \parallel_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0} + \parallel g^- \parallel_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \parallel g^- \parallel_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0},$$

где постоянная C_0 не зависит от λ и $\varepsilon_0 \in (0,1/15p)$ как угодно малая постоянная.

Доказательство. Утверждение доказывается довольно просто. Функция $v = \varphi_{0i}u$ есть решение задачи

$$-Lv = \varphi_{0i}f + [\varphi_{0i}, L]u = \tilde{f}, B^+v|_S = \varphi_{0i}g^+ - [\varphi_{0i}, B^+]u, Bv|_\Gamma = 0,$$
$$\frac{\partial v^+}{\partial N} = \frac{\partial v^-}{\partial N} + \varphi_{0iN}(v^+ - v^-) + g^-\varphi_{1i},$$

где
$[\varphi_{0i}, L]u = \varphi_{0i}Lu - L(\varphi_{0i}u) = -2\sum_{l,k=1}^n a_{lk}u_{x_k}\varphi_{0ix_l} - \sum_{l,k=1}^n a_{lk}u\varphi_{0ix_lx_k} - \sum_{k=1}^n a_k\varphi_{0ix_k}u$ и $[\varphi_i, B^+]u = -\sum_{k,l=1}^n a_{kl}^+\nu_k\varphi_{0ix_l}u^+$. Применяя оценку из теоремы 1 к функции v, получим

$$\parallel v \parallel_{W_p^2(G^+)} + \parallel v \parallel_{W_p^2(G^-)} + |\lambda| \parallel v \parallel_{L_p(G)} \le c_1(\parallel \varphi_{0i}f \parallel_{L_p(G)} + \parallel \varphi_{0i}g^+ \parallel_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)}$$
$$+ \parallel \varphi_{0i}g^+ \parallel_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0} + \parallel \varphi_{0i}g^- \parallel_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \parallel \varphi_{0i}g^- \parallel_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0} +$$
$$\parallel u^+(x^i(z',0)) \parallel_{W_p^{2s_0}(B_{\delta'})} + |\lambda|^{s_0} \parallel u^+(x^i(z',0)) \parallel_{L_p(B_{\delta'})} + \qquad (16)$$
$$\parallel u^-(x^i(z',0)) \parallel_{W_p^{2s_0}(B_{\delta'})} + |\lambda|^{s_0} \parallel u^-(x^i(z',0)) \parallel_{L_p(B_{\delta'})} +$$
$$\parallel u \parallel_{W_p^1(G^+\cap B_\delta(b_i))} + \parallel u \parallel_{W_p^1(G^-\cap B_\delta(b_i))}).$$

Последнее слагаемое оценивается через

$$\parallel u \parallel_{W_p^1(G^\pm\cap B_\delta(b_i))} \le c_2 \parallel u \parallel^{1/2}_{W_p^2(G^\pm\cap(B_{\delta_2}(b_i)))} \parallel u \parallel^{1/2}_{L_p(G^\pm\cap(B_{\delta_2}(b_i)))} \le$$
$$c_2|\lambda|^{-1/2}(\parallel u \parallel_{W_p^2(G^\pm\cap B_\delta(b_i))} + |\lambda| \parallel u \parallel_{L_p(G^\pm\cap B_\delta(b_i))}) \le c_2|\lambda|^{-1/2}J.$$

Аналогично (используем еще теоремы о следах)

$$\parallel u^\pm(x^i(z',0)) \parallel_{W_p^{2s_0}(B_{\delta'})} + |\lambda|^{s_0} \parallel u^\pm(x^i(z',0)) \parallel_{L_p(B_{\delta'})} \le$$
$$c_3|\lambda|^{-1/2+\varepsilon_0}(\parallel u \parallel_{W_p^2(G^\pm\cap B_\delta(b_i))} + |\lambda| \parallel u \parallel_{L_p(G^\pm\cap B_\delta(b_i))}) \le c_4|\lambda|^{-1/2+\varepsilon_0}J,$$

где $\varepsilon_0 \in (0,1/2)$ как угодно малая постоянная. Действительно, первое слагаемое в предыдущей сумме оценивается через

$$\parallel u^\pm(x^i(z',0)) \parallel_{W_p^{2s_0}(B_{\delta'})} \le c_5 \parallel u^\pm(x^i(z)) \parallel_{W_p^1(G^\pm\cap B_\delta(b_i))} \le c_6|\lambda|^{-1/2}J,$$

а второе через ($\theta = 1/2p + 2\varepsilon_0$)

$$|\lambda|^{s_0} \| u^{\pm}(x^i(z',0)) \|_{L_p(B_{\delta'})} \le c_6|\lambda|^{s_0} \| u^{\pm}(x^i(z)) \|_{W_p^{1/p+\varepsilon_0}(U^{\pm})} \le$$

$$c_7|\lambda|^{s_0} \| u \|^{\theta}_{W_p^2(G^{\pm}\cap B_\delta(b^i))} \| u \|^{1-\theta}_{L_p(G^{\pm}\cap B_\delta(b^i))} \le c_8|\lambda|^{-1/2+\varepsilon_0} J.$$

Подставляя полученные выше оценки в (16), получим неравенство

$$\| \varphi_{0i} u \|_{W_p^2(G^+)} + \| \varphi_{0i} u \|_{W_p^2(G^-)} + |\lambda| \| \varphi_{0i} u \|_{L_p(G)} \le$$

$$C_2(\| \varphi_{0i} f \|_{L_p(G)} + \| \varphi_{0i} g^+ \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \| \varphi_{0i} g^+ \|_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0} +$$

$$\| \varphi_{0i} g^- \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \| \varphi_{0i} g^- \|_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0} + c_6|\lambda|^{-1/2+\varepsilon_0} J.$$

Теорема 2. Пусть выполнены условия (5), (9)-(15). Тогда решение, полученное в теореме 1, обладает тем свойством, что $\nabla_{z'}\varphi_i u(x^i(z)) \in W_p^2(U^{\pm}), i = 1, \dots, r$, и справедлива оценка

$$\sum_{i=1}^{r} (\| \nabla_{z'}\varphi_i u(x^i(z)) \|_{W_p^2(U^+)} + \| \nabla_{z'}\varphi_i u(x^i(z)) \|_{W_p^2(U^-)} + |\lambda| \| \nabla_{z'}\varphi_i u(x^i(z)) \|_{L_p(U')})$$

$$\le C_1(|\lambda|^{\varepsilon_0} \sum_{i=1}^{r} (\| \varphi_{0i} g^+ \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \| \varphi_{0i} g^+ \|_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0} +$$

$$\| \varphi_{0i} g^- \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \| \varphi_{0i} g^- \|_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0} + \| \varphi_{0i} f \|_{L_p(G)}) + \sum_{i=1}^{r} \| \nabla_{z'}\varphi_i f \|_{L_p(U')}$$

$$+ \sum_{i=1}^{r} [\| \nabla_{z'}\varphi_i g^+(x^i(z',0)) \|_{W_p^{2s_0}(B_{\delta'})} + |\lambda|^{s_0} \| \nabla_{z'}\varphi_i g^+(x^i(z',0)) \|_{L_p(G)} +$$

$$\| \nabla_{z'}\varphi_i g^-(x^i(z',0)) \|_{W_p^{2s_0}(B_{\delta'})} + |\lambda|^{s_0} \| \nabla_{z'}\varphi_i g^- \|_{L_p(B_{\delta'})}] + |\lambda|^{-1/2+3\varepsilon_0} J),$$

где постоянная C_1 не зависит от $\lambda \ge \lambda_0$ и f, g, g^+, $\varphi_{0i} \in C_0^{\infty}(B_\delta)$, $\varphi_{0i}(x) = 1$ на $supp\ \varphi_i$, и $\varepsilon_0 \in (0, 1/15p)$ как угодно малая постоянная.

Доказательство. Доказательство использует метод конечных разностей и оценку из леммы 3. Считаем для удобства, что $supp\ \varphi_{0i} = 1$ на $B_{3\delta/4}$. Использование метода конечных разностей производится по схеме, изложенной в доказательстве теоремы 4, п. 3, § 2, гл. 4 в [29]. Поэтому мы остановимся только на основных моментах. Возьмем точку $b_i \in \Gamma_0$. Умножая уравнение на φ_i, для $v = \varphi_i u$, имеем:

$$-Lv = \varphi_i f + [\varphi_i, L]u = \tilde{f}, B^+ v|_S = \varphi_i g^+ - [\varphi_i, B^+]u,$$

$$\frac{\partial v^+}{\partial N}(x_0) = \frac{\partial v^-}{\partial N}(x_0) + \varphi_{iN}(v^+ - v^-) + g^-\varphi_i,$$

где $[\varphi_i, L]u = \varphi_i Lu - L(\varphi_i u) = -2\sum_{l,k=1}^{n} a_{lk} u_{x_k}\varphi_{ix_l} - \sum_{l,k=1}^{n} a_{lk} u\varphi_{ix_l x_k} - \sum_{k=1}^{n} a_k \varphi_{ix_k} u$ и $[\varphi_i, B^+]u = -\sum_{k,l=1}^{n} a_{kl}^+ \nu_k \varphi_{ix_l} u^+$. Запишем L в локальной системе координат y и обозначим полученные коэффициенты через $\tilde{a}_{ij}, \tilde{a}_i$. Выпрямим границу преобразованием $z_n = y_n - \gamma(y')$, $z' = y'$. Получим задачу

$$\tilde{L}v = \tilde{f},$$

$$\tilde{B}^+ v|_{z_n=0} = \varphi_i g^+(x^i(z',0)) - [\varphi_i, B^+]u^+(x^i(z',0)) = \tilde{g}^+(z'),$$

$$\frac{\partial v^+}{\partial N} = \frac{\partial v^-}{\partial N} + \varphi_{iN}(v^+ - v^-) + g^-\varphi_i, \varphi_{iN} = \frac{\partial \varphi_i}{\partial N},$$

где $\tilde{L}$, $\tilde{B}^+$ – операторы L, B^+, записанные в системе координат z. Обозначим коэффициенты $\tilde{L}$ через c_{kl}, c_k, оператор $\tilde{B}^+$ запишется в виде $\tilde{B}^+ v = \sum_{k=1}^{n} b_k(z') v_{z_k} - \beta(z')(v^+ - v^-)$. Пусть $\Delta_j v(z) = (v(z + e_j\eta) - v(z))/\eta$ (e_j – j-й координатный вектор), где $|\eta| < \delta/8$ и $j \le n-1$. Тогда функция $w = \Delta_j v$ есть решение задачи

$$\begin{aligned}&\tilde{L}(z,D)w = [\tilde{L},\Delta_j]v + \Delta_j\tilde{f} = \tilde{f}_0,\\ &\tilde{B}^+w|_{z_n=0} = [\tilde{B}^+,\Delta_j]v + \Delta_j\tilde{g}^+ = \tilde{g}_0^+,\\ &\frac{\partial w^+}{\partial N} = \frac{\partial w^-}{\partial N} + \Delta_j(\varphi_{iN}(v^+ - v^-)) + \Delta_j g^-\varphi_i + [\frac{\partial}{\partial N},\Delta_j](w^+ - w^-),\end{aligned} \tag{17}$$

где $[\tilde{L},\Delta_j]v = -\sum_{k,l=1}^{n}\Delta_j c_{kl}(z)v_{z_kz_l}(z+e_j\eta) - \sum_{k=1}^{n}\Delta_j c_k(z)v_{z_k}(z+e_j\eta) - \Delta_j c_0(z)v(z+e_j\eta)$, $[\tilde{B}^+,\Delta_j]v = -\sum_{k=1}^{n}\Delta_j b_k v_{z_l}(z'+e_j,\eta,0) + \Delta_j\beta(v^+ - v^-)(z'+e_j,\eta,0)$, где $e_j{}'$ – j-й координатный вектор в $\mathbb{R}^{n-1}$. Вернемся к переменным x и продолжим все функции в (17) нулем вне $U_j \cap G$. Тогда функция $w \in W_p^2(G^+) \cap W_p^2(G^-)$ есть решение задачи (7)-(8) с некоторыми новыми правыми частями в граничном условии и уравнении, т. е.

$$Lw = \tilde{f}_0\ (x \in G), Bw|_\Gamma = 0, B^+w = \tilde{g}_0^+, \frac{\partial w^+}{\partial N} = \frac{\partial w^-}{\partial N} + \tilde{g}^-. \tag{18}$$

По теореме 1, имеем оценку

$$\| w \|_{W_p^2(G^+)} + \| w \|_{W_p^2(G^-)} + |\lambda| \| w \|_{L_p(G)} \le$$
$$c_0(\| \tilde{f}_0 \|_{L_p(G)} + \| \tilde{g}_0^+ \|_{\widetilde{W}_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + |\lambda|^{s_0} \| \tilde{g}_0^+ \|_{L_p(\Gamma_0)} + \| \tilde{g}^- \|_{\widetilde{W}_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + |\lambda|^{s_0} \| \tilde{g}^- \|_{L_p(\Gamma_0)}).$$

Наша следующая цель – показать, что правая часть ограничена равномерно по параметру η. Это делается стандартным образом с использованием представлений

$$\Delta_j f = \int_0^1 f_{z_j}(z + e_j\tau\eta)\, d\tau.$$

Окончательное неравенство имеет вид

$$\begin{aligned}&\| \Delta_j v(z) \|_{W_p^2(U^+)} + \| \Delta_j v(z) \|_{W_p^2(U^-)} + |\lambda| \| \Delta_j v \|_{L_p(G)} \le c_1(\| \nabla_{z'}\varphi_i f \|_{L_p(U')} +\\ &\| f \|_{L_p(G)} + \| \nabla_{z'}\varphi_i g^+ \|_{W_p^{2s_0}(B_{\delta'})} + \| \nabla_{z'}\varphi_i g^+ \|_{L_p(B_{\delta'})} |\lambda|^{s_0} + \| \nabla_{z'}\varphi_i g^- \|_{L_p(B_{\delta'})} |\lambda|^{s_0}\\ &+ \| \nabla_{z'}\varphi_i g^- \|_{W_p^{2s_0}(B_{\delta'})} + \| u^+ \|_{W_p^{1+2s_0}(B_{3\delta/4'})} + |\lambda|^{s_0} \| u^+ \|_{W_p^1(B_{3\delta/4'})} + \| u^- \|_{W_p^{1+2s_0}(B_{3\delta/4'})} +\\ &|\lambda|^{s_0} \| u^- \|_{W_p^1(B_{3\delta/4'})} + \| u \|_{W_p^2(G^+\cap B_{3\delta/4}(b_i))} + \| u \|_{W_p^2(G^-\cap B_{3\delta/4}(b_i))}) = J_2,\end{aligned} \tag{19}$$

где постоянная c_1 не зависит от η. Используя лемму 3, получим оценку

$$\| \varphi_{0i}u(z) \|_{W_p^2(U^+)} + \| \varphi_{0i}u(z) \|_{W_p^2(U^-)} + |\lambda| \| \varphi_{0i}u \|_{L_p(G)} \le c_2(\| \varphi_{0i}g^+ \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} +$$
$$\| \varphi_{0i}g^- \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \| \varphi_{0i}g^+ \|_{L_p(\Gamma_0)} \left|\lambda|^{s_0} + \| \varphi_{0i}g^- \|_{L_p(\Gamma_0)}\right| \lambda|^{s_0} + \| \varphi_{0i}f \|_{L_p(G)} + \left|\lambda|^{-\frac{1}{2}+2\varepsilon_0} J\right).$$

Далее из теорем вложения мы можем записать неравенство

$$\| u^+ \|_{W_p^{1+2s_0}(B_{3\delta/4'})} + |\lambda|^{s_0} \| u^+ \|_{W_p^1(B_{3\delta/4'})} + \| u^- \|_{W_p^{1+2s_0}(B_{3\delta/4'})} + |\lambda|^{s_0} \| u^- \|_{W_p^1(B_{3\delta/4'})}$$
$$\| u \|_{W_p^2(G^+\cap B_{3\delta/4}(b_i))} + \| u \|_{W_p^2(G^-\cap B_{3\delta/4}(b_i))} \le c_3|\lambda|^{\varepsilon_0}(\| \varphi_{0i}u \|_{W_2^2(G^+\cap B_\delta(b_i))}$$
$$+ \| \varphi_{0i}u \|_{W_2^2(G^-\cap B_\delta(b_i))} + |\lambda| \| \varphi_{0i}u \|_{L_p(B_\delta(b_i))}).$$

Из двух последних неравенств вытекает, что величина J_2 допускает оценку

$$J_2 \le c_4(\| \nabla_{z'}\varphi_i f \|_{L_p(U')} + \| f \|_{L_p(G)} + \| \nabla_{z'}\varphi_i g^+ \|_{W_p^{2s_0}(B_{\delta'})} + \| \nabla_{z'}\varphi_i g^+ \|_{L_p(B_{\delta'})} |\lambda|^{s_0} +$$
$$\| \nabla_{z'}\varphi_i g^- \|_{L_p(B_{\delta'})} |\lambda|^{s_0} + \| \nabla_{z'}\varphi_i g^- \|_{W_p^{2s_0}(B_{\delta'})} + c_5|\lambda|^{\varepsilon_0}(\| \varphi_{0i}g^+ \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \| \varphi_{0i}g^- \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} +$$
$$\| \varphi_{0i}g^+ \|_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0} + \| \varphi_{0i}g^- \|_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0} + \| \varphi_{0i}f \|_{L_p(G)}) + c_6|\lambda|^{-1/2+3\varepsilon_0} J).$$

В силу произвольности j и известных свойств конечных разностей (см. в [3, гл. 1, лемма 4.6] и теоремы 4 п. 4, § 3, гл. 3 в [22]) заключаем, что для всех $j = 1,2,\dots,n-1$ существуют обобщенные производные $v_{z_j} \in W_p^2(U^+) \cap W_p^2(U^-)$. В силу произвольности параметров i, j справедлива оценка из утверждения теоремы.

Основные результаты

Приведем условия на данные. Считаем, что функции $\Phi_j(x)$ при всех допустимых j обладают свойствами

$$\Phi_j \in W_p^{2s_0}(\Gamma_0) \cap W_p^{2-1/p}(\Gamma_\delta)). \quad (20)$$

Пусть $\Phi(t)$ – матрица с элементами $\phi_{ij}(t) = \Phi_j(b_i)$ $(i, j = 1,2, \dots, r)$. В силу теорем вложения $\Phi_j(x) \in C^{\alpha_0}(\overline{\Gamma_0})$ с $\alpha_0 = 1 - n/p$ (см. теоремы вложения в [25]). Считая, что условия теорем 1, 2 выполнены, построим решение задачи сопряжения (7), (8), где возьмем $\beta = 0, g^- = 0$. Обозначим полученное решение через w_0. Функция $v = u - w_0$ есть решение задачи

$$Lv = 0, (x \in G), Bv|_\Gamma = 0, \quad (21)$$

$$\frac{\partial v^+}{\partial N} - \beta(v^+ - v^-) = \beta(w_0^+ - w_0^-), \frac{\partial v^+}{\partial N} = \frac{\partial v^-}{\partial N} \ (x \in \Gamma_0), \quad (22)$$

$$\begin{aligned} v^+(b_i) = \tilde{\psi}_i = \psi_i - w_0^+(b_i)(i = 1,2, \dots, r_1), \\ v^-(b_i) = \tilde{\psi}_i = \psi_i - w_0^-(b_i)(i = r_1 + 1, \dots, r). \end{aligned} \quad (23)$$

Дополнительные условия на данные имеют вид

$$\tilde{\psi}_i \neq 0 \ (i \leq r), |det \ \Phi| > 0. \quad (24)$$

Сформулируем основной результат.

Теорема 3. Пусть выполнены условия (5), (9)–(15), (20), (24). Тогда найдется параметр $\lambda_0 > 0$ такой, что при $\lambda \geq \lambda_0$ существует единственное решение u задачи (1)-(4) $(u, \beta_1, \dots, \beta_r)$ такое, что $u \in W_p^2(G^+) \cap W_p^2(G^-)$, причем $\nabla_z, \varphi_i u(x^i(z)) \in W_p^2(U^+) \cap W_p^2(U^-), i = 1, \dots, r$.

Доказательство. Достаточно доказать утверждение для вспомогательной задачи (21)-(23). Фиксируем $R_0 > 0$ (эту величину мы определим позже) и предположим, что $\vec{\alpha} = (\beta_1, \dots, \beta_r) \in B_{R_0} = \{\vec{\alpha} \in \widetilde{W}_p^{s_0}(0, \tau): |\vec{\alpha}| \leq R_0\}$. Фиксируя $\vec{\alpha} \in B_{R_0}$ и решая задачу (21), (22), мы тем самым построим отображение $\vec{\alpha} \to v(\vec{\alpha})$. Функция v обладает свойствами, указанными в формулировках теорем 1, 2. Мы сведем вопрос разрешимости задачи (21)-(23) к вопросу разрешимости приведенного ниже операторного уравнения относительно вектора $\vec{\alpha}$, разрешимость которого устанавливается при помощи теоремы о неподвижной точке. Кроме отображения $\vec{\alpha} \to v(\vec{\alpha})$, нам понадобится еще одно отображение. Пусть v – решение задачи (21), (22). Фиксируя k и умножая уравнение (30) на φ_k, имеем

$$-Lw = [\varphi_k, L]v = f_{0k}, w = \varphi_k v, \quad (25)$$

где $[\varphi_k, L]v = \varphi_k Lv - L(\varphi_k v) = -2\sum_{i,j=1}^n a_{ij} v_{x_i} \varphi_{kx_j} - \sum_{i,j=1}^n a_{ij} v \varphi_{kx_i x_i} - \sum_{i=1}^n a_i \varphi_{kx_i} v$. Сделав замену переменных $x = x^k(z)$, перепишем (25) в виде

$$-b_{nn}^{\pm}(z) w_{kz_n z_n}^{\pm} + \lambda w_k = \sum_{i+j<2n} b_{ij}^{\pm} w_{kz_i z_j}^{\pm} + \sum_{i=1}^n b_i^{\pm} w_{kz_i}^{\pm} + b_0^{\pm} w_k^{\pm} + f_{0k} = f_k(z), z \in U^{\pm}, \quad (26)$$

где $w_k^{\pm} = \varphi_k v(x^k(z))|_{U^{\pm}}$. Отметим, что $b_{nn}^{\pm} > 0$ для всех z в силу эллиптичности оператора L. Рассмотрим уравнения

$$-b_{nn}^+(0, z_n)\omega_{iz_n z_n} + \lambda\omega_i = f_i(0, z_n) \ (i = 1,2, \dots, r_1), z_n \in (0, \delta_1), \quad (27)$$

$$-b_{nn}^-(0, z_n)\omega_{iz_n z_n} + \lambda\omega_i = f_i(0, z_n) \ (i = r_1 + 1, \dots, r), z_n \in (-\delta_1, 0). \quad (28)$$

Дополним уравнения (27), (28) начальными и краевыми условиями

$$\omega_i|_{z_n=0} = \tilde{\psi}_i, \omega_i|_{z_n=\delta_1} = 0, i \leq r_1. \quad (29)$$

$$\omega_i|_{z_n=0} = \tilde{\psi}_i, \omega_i|_{z_n=-\delta_1} = 0, i > r_1. \quad (30)$$

Пусть $v(\vec{\alpha})$ – решение задачи (21), (22), построим функции ω_i как решение задачи (27), (29) (или (28), (30) соответственно). В случае, если $v(\vec{\alpha})$ есть решение задачи (21)-(22), то

$\omega_i(z_n) = w_i^+(x^i(0,z_n))$ при $i \le r_1$ и $\omega_i(z_n) = w_i^-(x^i(0,z_n))$ при $i > r_1$. Перепишем равенства (24) в окрестности U_i в виде

$$\begin{aligned} &\sum_{j=1}^n b_j(z')v_{z_j}^+(x^i(z',0)) = (\beta(v^+ - v^-) + \beta(w_0^+ - w_0^-))(x^i(z',0)), \\ &\sum_{j=1}^n b_j(z')v_{z_j}^+(x^i(z',0)) = \sum_{j=1}^n b_j(z')v_{z_j}^-(x^i(z',0))). \end{aligned} \tag{31}$$

Если функции $v, \vec{\alpha}$ есть решение обратной задачи, то легко увидеть, что $\omega_{iz_n}(0) = v_{z_n}^+(x^i(0,0))$ при $i \le r_1$ и $\omega_{iz_n}(0) = v_{z_n}^-(x^i(0,0))$ при $i > r_1$. Полагая $z' = 0$ и используя (31), мы придем к равенствам

$$b_n(0)\omega_{iz_n}(0) + \sum_{j=1}^{n-1} b_j(0)v_{z_j}^+(x^i(0)) = \beta(\tilde{\psi}_i - v^-)(x^i(0)) + \beta(w_0^+ - w_0^-)(x^i(0)), i \le r_1, \tag{32}$$

$$b_n(0)\omega_{iz_n}(0) + \sum_{j=1}^{n-1} b_j(0)v_{z_j}^-\left(x^i(0)\right) = \beta\left(v^+ - \tilde{\psi}_i\right)\left(x^i(0)\right) + \beta(w_0^+ - w_0^-)\left(x^i(0)\right), i > r_1, \tag{33},$$

которые также можно переписать в виде

$$\begin{aligned} &\beta(x^i(0)) = (b_n(0)\omega_{iz_n}(0) + \sum_{j=1}^{n-1} b_j(0)v_{z_j}^+(x^i(0)) + \beta v^-(x^i(0)) + \\ &\beta(w_0^+ - w_0^-)(x^i(0)))/\tilde{\psi}_i = F_i, i = 1,2,\dots,r_1 \end{aligned} \tag{34}$$

$$\begin{aligned} &\beta(x^i(0)) = (-b_n(0)\omega_{iz_n}(0) - \sum_{j=1}^{n-1} b_j(0)v_{z_j}^+(x^i(0)) + \beta v^+(x^i(0)) + \\ &\beta(w_0^+ - w_0^-)(x^i(0)))/\tilde{\psi}_i = F_i, i = r_1 + 1, \dots, r. \end{aligned} \tag{35}$$

Здесь функция v строится как решение задачи (21), (22), а функции ω_i как решение задач задачи (27), (29) (или (28), (30) соответственно). Отметим, что в силу (24) знаменатели в равенствах (34), (35) отделены от нуля. Это и есть искомая система уравнений для нахождения координат вектора $\vec{\alpha}$. Она также может быть переписана в виде

$$\vec{\alpha} = \Phi^{-1}\vec{F}(\vec{\alpha}) = R(\vec{\alpha}), \tag{36}$$

где координаты вектора F определены равенствами (34), (35). Отметим, что условие (24) гарантирует оценку

$$|\Phi^{-1}\vec{F}| \le c|\vec{F}|. \tag{37}$$

Покажем, что оператор $R(\vec{\alpha})$ является сжимающим в некотором шаре B_{R_0} и переводит его в себя. Возьмем $\vec{\alpha} = 0$. Тогда в силе единственности решений задачи сопряжения (21), (22) $v = v(\vec{\alpha}) = 0$, в этом случае вектор $\vec{F}(0)$ запишется в виде

$$\begin{aligned} &F_i(0) = b_n(0)\omega_{iz_n}(0)/\tilde{\psi}_i, i = 1, \dots, r_1. \\ &F_i(0) = -b_n(0)\omega_{iz_n}(0)/\tilde{\psi}_i, i = r_1 + 1, \dots, r, \end{aligned}$$

где функции ω_i решения задач задачи (27), (29) (или (28), (30) соответственно), где в правой части равенств (27), (28) стоят нули. Положим, $R_0 = 2|\Phi^{-1}\vec{F}(0)|$. Если у нас есть два вектора $\vec{\alpha}_i \in B_{R_0}$, $i = 1,2$, то неравенство (37) влечет

$$|R(\vec{\alpha}_1) - R(\vec{\alpha}_2)| \le c\sum_{i=1}^r |F_i(\vec{\alpha}_1) - F_i(\vec{\alpha}_2)|. \tag{38}$$

Проверим выполнение условий теоремы о неподвижной точке. Вначале получим оценки для решений $v(\vec{\alpha})$. Из теоремы 1 имеем оценку

$$\begin{aligned} &\| v \|_{W_p^2(G^+)} + \| v \|_{W_p^2(G^-)} + |\lambda| \| v \|_{L_p(G)} \le c_0(\| \beta(v^+ - v^-) + \beta(w_0^+ - w_0^-) \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} \\ &+ \| \beta(v^+ - v^-) + \beta(w_0^+ - w_0^-) \|_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0} = c_0 J_0, \end{aligned} \tag{39}$$

где постоянная c_0 не зависит от λ. В силу леммы 2 получим, что

$$\begin{aligned} &J_0 \le c_1 \| \beta \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} (\| v^+ - v^- \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \| w_0^+ - w_0^- \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \\ &|\lambda|^{s_0}(\| v^+ - v^- \|_{L_p(\Gamma_0)} + \| w_0^+ - w_0^- \|_{L_p(\Gamma_0)})). \end{aligned} \tag{40}$$

Из теорем вложения имеем

$$\| v^\pm \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} \le c_2 \| v \|_{W_p^1(G^\pm)} \le c_2|\lambda|^{-1/2}(\| v \|_{W_p^2(G^\pm)} + |\lambda| \| v \|_{L_p(G)}). \tag{41}$$

Кроме того, имеем

$$|\lambda|^{s_0} \| v^{\pm} \|_{L_p(\Gamma_0)} \le c_3 \| v \|_{W_p^{1/p+\varepsilon_0}(G^{\pm})} |\lambda|^{s_0} \le c_4 |\lambda|^{-1/2+\varepsilon_0/2} (\| v \|_{W_p^2(G^{\pm})} + |\lambda| \| v \|_{L_p(G)}), \quad (42)$$

где $\varepsilon_0 \in (0,1/2)$ как угодно малая положительная постоянная. Неравенства (39)-(42) гарантируют оценку

$$\| v \|_{W_p^2(G^+)} + \| v \|_{W_p^2(G^-)} + |\lambda| \| v \|_{L_p(G)} \le c_5 \| \beta \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} |\lambda|^{-1/2+\varepsilon_0/2} (\| v \|_{W_p^2(G^+)} + \| v \|_{W_p^2(G^-)} + |\lambda| \| v \|_{L_p(G)}) + c_6 \| \beta \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} (\| w_0^+ - w_0^- \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + |\lambda|^{s_0} \| w_0^+ - w_0^- \|_{L_p(\Gamma_0)}). \quad (43)$$

Выбрав $\lambda_1 \ge \lambda_0$ такое, что $c_5 R_0 \lambda_1^{-1/2+\varepsilon_0} \le 1/2$, из (43) получим при $\lambda \ge \lambda_1$, что

$$\begin{aligned} &\| v \|_{W_p^2(G^+)} + \| v \|_{W_p^2(G^-)} + |\lambda| \| v \|_{L_p(G)} \le \\ &2c_6 \| \beta \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} (\| w_0^+ - w_0^- \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + |\lambda|^{s_0} \| w_0^+ - w_0^- \|_{L_p(\Gamma_0)}). \end{aligned} \quad (44)$$

Сейчас мы запишем оценки из теоремы 2. Как вытекает из этой теоремы, имеет место оценка

$$\sum_{i=1}^{r} (\| \nabla_{z'} \varphi_i v(x^i(z)) \|_{W_p^2(U^+)} + \| \nabla_{z'} \varphi_i v(x^i(z)) \|_{W_p^{1,2}(U^-)} + |\lambda| \| \nabla_{z'} \varphi_i v(x^i(z)) \|_{L_p(U')}) \le$$

$$c_7 (\| \beta(v^+ - v^-) + \beta(w_0^+ - w_0^-) \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + |\lambda|^{s_0} \| \beta(v^+ - v^-) + \beta(w_0^+ - w_0^-) \|_{L_p(\Gamma_0)}) +$$

$$c_8 (\sum_{i=1}^{r} (\| \nabla_{z'} \varphi_i (\beta(v^+ - v^-) + \beta(w_0^+ - w_0^-)) \|_{W_p^{2s_0}(B_{\delta'})} +$$

$$|\lambda|^{s_0} \| \nabla_{z'} \varphi_i (\beta(v^+ - v^-) + \beta(w_0^+ - w_0^-)) \|_{L_p(B_{\delta'})}),$$

где постоянная C_1 не зависит от $\lambda \ge \lambda_0$. Повторяя предыдущие рассуждения, используемые при выводе (43), и используя оценку (44), придем к неравенству вида

$$\sum_{i=1}^{r} (\| \nabla_{z'} \varphi_i v(x^i(z)) \|_{W_p^2(U^+)} + \| \nabla_{z'} \varphi_i v(x^i(z)) \|_{W_p^2(U^-)} + |\lambda| \| \nabla_{z'} \varphi_i v(x^i(z)) \|_{L_p(U')}) \le$$

$$c_8 \lambda^{-1/2+\varepsilon_0/2} (\sum_{i=1}^{r} (\| \nabla_{z'} \varphi_i v(x^i(z)) \|_{W_p^2(U^+)} + \| \nabla_{z'} \varphi_i v(x^i(z)) \|_{W_p^2(U^-)} + |\lambda| |\nabla_{z'} \varphi_i v(x^i(z)) \|_{L_p(U')})$$

$$+ c_9 (\sum_{i=1}^{r} \| \nabla_{z'} \varphi_i (w_0^+ - w_0^-) \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \| \nabla_{z'} \varphi_i (w_0^+ - w_0^-) \|_{L_p(\Gamma_0)} +$$

$$(\| w_0^+ - w_0^- \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + |\lambda|^{s_0} \| w_0^+ - w_0^- \|_{L_p(\Gamma_0)}),$$

где постоянные c_i не зависят от λ и зависят от величины R_0. Выберем $\lambda_2 \ge \lambda_1$ такое, что $c_8 \lambda_2^{-1/2+\varepsilon_0}/2 \le 1/2$. Тогда при $\lambda \ge \lambda_2$ будет выполнено неравенство

$$\begin{aligned} &\textstyle\sum_{i=1}^{r} (\| \nabla_{z'} \varphi_i v(x^i(z)) \|_{W_p^2(U^+)} + \| \nabla_{z'} \varphi_i v(x^i(z)) \|_{W_p^2(U^-)} + |\lambda| \| \nabla_{z'} \varphi_i v(x^i(z)) \|_{L_p(U')}) \le \\ &2c_9 (\textstyle\sum_{i=1}^{r} (\| \nabla_{z'} \varphi_i (w_0^+ - w_0^-) \|_{W_p^{2s_0}(B_{\delta'})} + \| \nabla_{z'} \varphi_i (w_0^+ - w_0^-) \|_{L_p(B_{\delta'})}) + \\ &\left(\| w_0^+ - w_0^- \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \left|\lambda|^{s_0} \| w_0^+ - w_0^- \|_{L_p(\Gamma_0)}\right). \end{aligned} \quad (45)$$

Оценим норму правой части. По теореме 1

$$\| w_0 \|_{W_p^2(G^+)} + \| w_0 \|_{W_p^2(G^-)} + |\lambda| \| w_0 \|_{L_p(G)} \le c_{10} (\| f \|_{L_p(G)} + \| g^+ \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \| g^+ \|_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0} + + \| g \|_{W_p^{2k_0}(\Gamma)} + |\lambda|^{k_0} \| g \|_{L_p(\Gamma)}) = C_0 J.$$

В частности, отсюда вытекает оценка

$$\| w_0^{\pm} \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + |\lambda|^{s_0} \| w_0^{\pm} \|_{L_p(\Gamma_0)} \le$$
$$c_1|\lambda|^{-1/2+\varepsilon_0}(\| w_0 \|_{W_p^2(G^+)} + \| w_0 \|_{W_p^2(G^-)} + |\lambda| \| w_0 \|_{L_p(G)}) \le C_1 + C_2|\lambda|^{s_0+\varepsilon_0}, \quad (46)$$

где C_i – постоянные, не зависящие от λ. Далее мы используем лемму 3. Возьмем $\varphi_{0i} \in C_0^{\infty}(B_{\delta}(b_i))$ такую, что $\varphi_{0i} = 1$ на $supp\ \varphi_i$.

$$\| \varphi_{0i}w_0 \|_{W_p^2(G^+)} + \| \varphi_{0i}w_0 \|_{W_p^2(G^-)} + |\lambda| \| \varphi_{0i}w_0 \|_{L_p(G)} \le C_0(\| \varphi_{0i}f \|_{L_p(G)} + \| \varphi_{0i}g^+ \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} +$$
$$\| \varphi_{0i}g^+ \|_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0} + |\lambda|^{-1/2+3\varepsilon_0}J),$$
$$J = \| g \|_{W_p^{2k_0}(\Gamma)} + |\lambda|^{k_0} \| g \|_{L_p(\Gamma)} + \| f \|_{L_p(G)} + \| g^+ \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \| g^+ \|_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0}.$$

Из этого неравенства вытекает оценка

$$\| \varphi_{0i}w_0 \|_{W_p^2(G^+)} + \| \varphi_{0i}w_0 \|_{W_p^2(G^-)} + |\lambda| \| \varphi_{0i}w_0 \|_{L_p(G)} \le C_3 + C_4|\lambda|^{s_0+3\varepsilon_0}, \quad (47)$$

где ε_0 как угодно малая положительная постоянная. Далее, используя теорему 2, получим неравенство

$$\sum_{i=1}^{r} (\| \nabla_{z'}\varphi_i w_0(x^i(z)) \|_{W_p^2(U^+)} + \| \nabla_{z'}\varphi_i w_0(x^i(z)) \|_{W_p^2(U^-)} + |\lambda| \| \nabla_{z'}\varphi_i w_0(x^i(z)) \|_{L_p(U')})$$
$$\le c_3(\| g^+ \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \| g^+ \|_{L_p(\Gamma_0)} |\lambda|^{s_0} + \| f \|_{L_p(G)}) + c_4(\| g \|_{W_p^{2k_0}(\Gamma)} + |\lambda|^{s_0+3\varepsilon_0} \| g \|_{L_p(\Gamma)}) +$$
$$c_5(\sum_{i=1}^{r} \| \nabla_{z'}\varphi_i f \|_{L_p(U')} + \sum_{i=1}^{r} [\| \nabla_{z'}\varphi_i g^+(x^i(z',0)) \|_{W_p^{2s_0}(B_{\delta'})} + |\lambda|^{s_0} \| \nabla_{z'}\varphi_i g^+(x^i(z',0)) \|_{L_p(B_{\delta'})}]),$$

где c_i постоянные, не зависящие от параметра $\lambda \ge \lambda_1$. Как и ранее, имеем неравенство

$$\sum_{i=1}^{r} (\| \nabla_{z'}\varphi_i w_0(x^i(z)) \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma)} + |\lambda|^{s_0} \| \nabla_{z'}\varphi_i w_0(x^i(z)) \|_{L_p(G)} +$$
$$|\lambda| \| \nabla_{z'}\varphi_i w_0(x^i(z)) \|_{L_p(U')}) \le C_5 + C_6|\lambda|^{s_0+3\varepsilon_0}. \quad (48)$$

В силу (20) $\beta \in W_p^{2s_0}(\Gamma_0)$, $\nabla_{z'}\beta(x^i(z',0)) \in W_p^{2s_0}(B_{\delta}')$ $(i = 1, \dots, r)$ и имеем оценки

$$\| \beta \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} \le c_0 \sum_{i=1}^{r} |\beta_i| \| \Phi_i \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} \le |\vec{\alpha}|c_1 \le c_1R_0, \quad (49)$$

$$\| \nabla_{z'}\beta(x^i(z',0)) \|_{W_p^{2s_0}(B_{\delta'})} \le c_0 \sum_{i=1}^{r} |\beta_i| \| \nabla_{z'}\Phi_i \|_{W_p^{2s_0}(B_{\delta'})} \le c_2|\vec{\alpha}| \le c_2R_0. \quad (50)$$

Пусть $\vec{\alpha}_i = (\beta_{i1}, \beta_{i2}, \dots, \beta_{ir}) \in B_{R_0}$ $(i = 1,2)$ и v_i – соответствующие решения задачи (21)-(22), где функция β заменяется на соответствующие функции $\beta^j = \sum_{i=1}^{r} \beta_{ji}\Phi_i$ $(j = 1,2)$. Тогда разности $v_1 - v_2 = \tilde{\omega}$, $\tilde{\beta} = \beta^1 - \beta^2$ есть решение задачи

$$-L\tilde{\omega} = 0, x \in G,$$
$$B\tilde{\omega}|_{\Gamma} = 0, \text{для } x \in \Gamma_0 \colon \frac{\partial\tilde{\omega}^+}{\partial N} = \frac{\partial\tilde{\omega}^-}{\partial N},$$
$$\frac{\partial\tilde{\omega}^+}{\partial N} = \frac{(\beta^1 + \beta^2)}{2}(\tilde{\omega}^+ - \tilde{\omega}^-) + \frac{\tilde{\beta}}{2}(v_1^+ + v_2^+ - v_1^- - v_2^-) + \tilde{\beta}(w_0^+ - w_0^-).$$

Теперь мы повторим рассуждения, использованные при получении оценок (43), (45), но применительно к этой задаче вместо задачи (21), (22). Точно так же, используя оценку (43), получим, что при $\lambda \ge \lambda_3 \ge \lambda_2$ (для некоторого λ_3) справедливо неравенство

$$\| \tilde{\omega} \|_{W_p^2(G^+)} + \| \tilde{\omega} \|_{W_p^2(G^-)} + |\lambda| \| \tilde{\omega} \|_{L_p(G)} \le$$
$$2c_6|\vec{\alpha}_1 - \vec{\alpha}_2| \left(\| w_0^+ - w_0^- \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \left|\lambda|^{s_0} \| w_0^+ - w_0^- \|_{L_p(\Gamma_0)} \right), \quad (51)$$

где c_6 не зависит от λ. Аналогично при $\lambda \ge \lambda_4 \ge \lambda_3$ имеем оценку

$$\sum_{i=1}^{r}(\| \nabla_{z'}\varphi_i\widetilde{\omega}(x^i(z)) \|_{W_p^2(U^+)} + \| \nabla_{z'}\varphi_i\widetilde{\omega}(x^i(z)) \|_{W_p^2(U^-)} + |\lambda|\|\widetilde{\omega}(x^i(z)) \|_{L_p(U')}) \le$$
$$c_{10}|\vec{\alpha}_1 - \vec{\alpha}_2|(\sum_{i=1}^{r} \| \nabla_{z'}\varphi_i(w_0^+ - w_0^-) \|_{W_p^{2s_0}(B_{\delta'})} + |\lambda|^{s_0} \| \nabla_{z'}\varphi_i(w_0^+ - w_0^-) \|_{L_p(B_{\delta'})} + \quad (52)$$
$$(\| w_0^+ - w_0^- \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + |\lambda|^{s_0} \| w_0^+ - w_0^- \|_{L_p(B_\delta')})).$$

Аналог оценок (49), (50) в нашем случае дает неравенство

$$\| \tilde{\beta} \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + \sum_{i=1}^{r} \| \nabla_{z'}\tilde{\beta}(x^i(z',0)) \|_{W_p^{2s_0}(B_{\delta'})} \le c|\vec{\alpha}_1 - \vec{\alpha}_2|. \quad (53)$$

Пусть w_i^j $(j = 1,2)$ решения задач (27), (29) и (28, (30) с новыми правыми частями, где вместо v стоят функции v_j. Пусть $w^0 = \varphi_i\widetilde{\omega}$. Тогда разности $k_i = w_i^1 - w_i^2$ есть решения задач

$$-b_{nn}^+(0,z_n)k_{iz_nz_n} + \lambda k_i = \sum_{i+j<2n} b_{ij}\omega^0_{z_iz_j} + \sum_{i=1}^{n} b_i\omega^0_{z_i} + b_0\omega^0 + [\varphi_i, L]\widetilde{\omega}|_{z'=0} = \tilde{f}_i|_{z'=0}, \quad (54)$$
$$k_i|_{z_n=0} = 0, k_i|_{z_n=\delta_1} = 0, i \le r_1. \quad (55)$$
$$-b_{nn}^-(0,z_n)k_{iz_nz_n} + \lambda k_i = \sum_{i+j<2n} b_{ij}\omega^0_{z_iz_j} + \sum_{i=1}^{n} b_i\omega^0_{z_i} + b_0\omega^0 + [\varphi_i, L]\widetilde{\omega}|_{z'=0} = \tilde{f}_i|_{z'=0}, \quad (56)$$
$$k_i|_{t=0} = 0, k_i|_{z_n=0} = 0, k_i|_{z_n=-\delta_1} = 0, i > r_1. \quad (57)$$

Из теории обыкновенных дифференциальных уравнений имеем оценку

$$\sum_{i=1}^{r_1}(\| k_i \|_{W_p^2((0,\delta_1))} + |\lambda| \| k_i \|_{L_p(0,\delta_1)}) + \sum_{i=r_1+1}^{r}(\| k_i \|_{W_p^2((-\delta_1,0))} + |\lambda| \| k_i \|_{L_p(-\delta_1,0)}) \le$$
$$\sum_{i=1}^{r_1} \| \tilde{f}_i(0,z_n) \|_{L_p((0,\delta_1))} + \sum_{i=r_1+1}^{r} \| \tilde{f}_i(0,z_n) \|_{L_p((-\delta_1,0))}. \quad (58)$$

Приведем оценку для правой части. Пусть, например, $i \le r_1$. Имеем

$$\| f_i(0,z_n) \|_{L_p(0,\delta_1)} \le c_1 \| f_i(z',z_n) \|_{W_p^s(B_{\delta'};L_p((0,\delta_1)))} = J, s = (n-1)/p + \varepsilon_0,$$

в силу теорем вложения (см. следствие 4.3 и соотношения (3.1)-(3.12) в [28]). Далее используем неравенства, вытекающие из соответствующих интерполяционных теорем (см. [25])

$$J \le c_1 \| f_i(z) \|^{\theta}_{W_p^1(B_{\delta'};L_p((0,\delta_1)))} \| f_i(z) \|^{1-\theta}_{W_p^{-1}(B_{\delta'};L_p((0,\delta_1)))}, 2\theta - 1 = s. \quad (59)$$

Исходя из определения f_i и условий (9), (11) на коэффициенты, имеем

$$\| f_i \|_{W_p^{-1}(B_{\delta'};L_p((0,\delta_1)))} \le c \| \widetilde{\omega} \|_{W_p^1(U^+))} \le c_1\lambda^{-1/2}(\| \widetilde{\omega} \|_{W_p^2(U^+)} + |\lambda| \| \widetilde{\omega} \|_{L_p(G^+)}), \quad (60)$$

где постоянная c_1 не зависит от τ. Последняя оценка получается, если мы используем интерполяционное неравенство

$$\| \widetilde{\omega} \|_{W_p^1(U^+)} \le c \| \widetilde{\omega} \|^{1/2}_{W_p^2(U^+)} \| \widetilde{\omega} \|^{1/2}_{L_p(U^+)}.$$

Также в силу условий (11) (используем еще вложение $W_p^1(U^+) \subset L_\infty(U^+)$)

$$\| f_i(z) \|_{W_p^1(B_{\delta'};L_p((0,\delta_1)))} \le c(\| \widetilde{\omega} \|_{W_p^2(G^+)} + \| \nabla_{z'}\varphi_i\widetilde{\omega}(z) \|_{W_p^2(U^+)}). \quad (61)$$

Оценки (50)-(51) влекут, что

$$\| f_i(0,z_n) \|_{L_p(0,\delta_1)} \le c_2\lambda^{(\theta-1)/2}(\| \nabla_{z'}\varphi_i\widetilde{\omega}(z) \|_{W_p^2(U^+)} +$$
$$\| \nabla_{z'}\varphi_i\widetilde{\omega}(z) \|_{W_p^2(U^-)} + \| \widetilde{\omega} \|_{W_p^2(U^+)} + \| \widetilde{\omega} \|_{W_p^2(U^-)} + |\lambda| \| \widetilde{\omega} \|_{L_p(G^+)}), \quad (62)$$

где c_2 – постоянная, не зависящая от τ. Очевидно, что точно такая оценка имеет место и при $i > r_1$. Используя оценки (57), (61), получим

$$\sum_{i=1}^{r_1}(\| k_i \|_{W_p^2((0,\delta_1))} + |\lambda| \| k_i \|_{L_p(0,\delta_1)}) + \sum_{i=r_1+1}^{r}(\| k_i \|_{W_p^2((-\delta_1,0))} + |\lambda| \| k_i \|_{L_p(-\delta_1,0)})$$
$$\le c_3\lambda^{(\theta-1)/2}(\| \nabla_{z'}\varphi_i\widetilde{\omega}(z) \|_{W_p^2(U^+(\tau))} + \quad (63)$$
$$\| \nabla_{z'}\varphi_i\widetilde{\omega}(z) \|_{W_p^2(U^-)} + \| \widetilde{\omega} \|_{W_p^2(U^+)} + \| \widetilde{\omega} \|_{W_p^2(U^-)} + |\lambda| \| \widetilde{\omega} \|_{L_p(G^+)}).$$

В частности, отсюда и из (51), (52), (63) вытекает неравенство

$$\sum_{i=1}^{r} |k_{iz_n}(0)| \le c\lambda^{-1/2+1/2p+\varepsilon_0/2}(\| k_i \|_{W_p^2(0,\delta)} + |\lambda| \| k_i \|_{L_p(0,\delta)}) \le$$
$$c_1\lambda^{\gamma} C_0(\lambda)|\vec{\alpha}_1 - \vec{\alpha}_2|, \gamma = -3/4 + (n+1)/4p + 3\varepsilon_0/4, \quad (64)$$

где, в отличие от других постоянных, постоянная $C_0(\lambda)$ зависит от λ

$$C_0(\lambda) = \sum_{i=1}^{r} (\| \nabla_{z'}\varphi_i(w_0^+ - w_0^-) \|_{W_p^{2s_0}(B_{\delta'})} + |\lambda|^{s_0} \| \nabla_{z'}\varphi_i(w_0^+ - w_0^-) \|_{L_p(B_{\delta'})}) +$$
$$\| w_0^+ - w_0^- \|_{W_p^{2s_0}(\Gamma_0)} + |\lambda|^{s_0} \| w_0^+ - w_0^- \|_{L_p(B_{\delta'})}.$$

Однако мы имеем, что в силу (46), (48), что

$$C_0(\lambda) \le c_5 + c_6|\lambda|^{s_0+3\varepsilon_0}. \quad (65)$$

Тогда неравенство (64) может быть переписано в виде

$$\sum_{i=1}^{r} |k_{iz_n}(0)| \le C|\lambda|^{\frac{15\varepsilon_0}{4} - \frac{1}{4} + \frac{n-1}{4p}}, \quad (66)$$

где постоянная C не зависит от λ. Мы получили необходимые оценки. Оценим теперь норму $|R(\vec{\alpha}_1) - R(\vec{\alpha}_2)|$, считая, что $\lambda \ge \lambda_4$. В силу (38) оценим норму $|\vec{F}_1 - \vec{F}_2|$. Приведем покоординатные оценки. Рассмотрим первое слагаемое в координате $F_i(\vec{\alpha}_1) - F_i(\vec{\alpha}_2)$. Пусть, например, $i \le r_1$. Оно записывается в виде

$$J_1 = b_n(\omega_{iz_n}^1(0) - \omega_{iz_n}^2(0))/\tilde{\psi}_i, \quad (67)$$

где $b_n = \sqrt{1 + |\nabla\gamma|^2}\sum_{k,l=1}^{n} \tilde{a}_{k,l}(y^i(z))\nu_k\nu_l|_{z_n=0}$ ($\tilde{a}_{k,l}$ – старшие коэффициенты L, записанного в локальной системе координат y). Здесь $\nu_k = -\gamma_{z_k}(z')/\sqrt{1 + |\nabla\gamma|^2}$ при $k < n$ и $\nu_n = 1/\sqrt{1 + |\nabla\gamma|^2}$. В силу условий на коэффициенты 2 и неравенства (63) имеем

$$|J_1| \le c|\omega_{iz_n}^1(0) - \omega_{iz_n}^2(0)| \le c_2 C_0(\lambda)\lambda^{\gamma}|\vec{\alpha}_1 - \vec{\alpha}_2|, \quad (68)$$

где все постоянные не зависят от λ, за исключением $C_0(\lambda)\tau$. Рассмотрим второе слагаемое. Пусть, например, $i \le r_1$.

$$J_2 = \sum_{i=1}^{n-1} (b_i(0)\tilde{w}_{z_i}^+(x^i(0)) + \beta\tilde{w}^-)(x^i(0)))/\tilde{\psi}_i.$$

В силу условий на коэффициенты имеем

$$|J_2| \le c_3 \sum_{i=1}^{r} (|\tilde{w}^+(x^i(0))| + |\tilde{w}^-(x^i(0))| + |\nabla_{z'}(\tilde{w}^+(x^i(z)))|_{z=0}.$$

Каждое из слагаемых, входящих в эту сумму, оценивается одинаково. Рассмотрим, например, последнее слагаемое в оценке для $|J_2|$. Имеем (см. например, [25])

$$\left|\nabla_{z'}\left(\tilde{w}^+\left(x^i(z)\right)\right)|_{z=0}\right| \le c_4 \| \nabla_{z'}\varphi_i\left(\tilde{w}^+\left(x^i(z)\right)\right) \|_{W_p^s(U^+)}, s = \frac{n}{p} + \varepsilon_0.$$

Далее, используя интерполяционное неравенство и теоремы о следах (см. [25]), получим

$$|\nabla_{z'}(\tilde{w}^+(x^i(z)))|_{z=0}| \le c_2 \| \nabla_{z'}\varphi_i(\tilde{w}^+(x^i(z))) \|_{W_p^s(U^+)} \le$$
$$c_3 \| \nabla_{z'}\varphi_i(\tilde{w}^+(x^i(z))) \|_{W_p^2(U^+)}^{\theta} \| \nabla_{z'}\varphi_i(\tilde{w}^+(x^i(z))) \|_{L_p(U^+)}^{1-\theta} \le$$
$$c_4|\lambda|^{\theta-1}(\| \nabla_{z'}\varphi_i(\tilde{w}^+(x^i(z))) \|_{W_p^2(U^+)} + |\lambda| \| \varphi_i(\tilde{w}^+(x^i(z))) \|_{L_p(U^+)}, \theta = n/2p + \varepsilon_0/2.$$

Используя (51), (52) и (65), получим оценку

$$\| \nabla_{z'}(\tilde{w}^+(x^i(z)))|_{z=0} \|_{\tilde{W}_p^{s_0}(0,\tau)} \le c_6\lambda^{-1/2+(n-1)/2p+7\varepsilon_0/2}|\vec{\alpha}_1 - \vec{\alpha}_2|.$$

Аналогично оцениваются оставшиеся слагаемые в $|J_2|$, и можно сказать, что

$$|J_2| \le c_7\lambda^{-1/2+(n-1)/2p+7\varepsilon_0/2}|\vec{\alpha}_1 - \vec{\alpha}_2| \quad (69)$$

для некоторой не зависящей от λ постоянной c_7. Оценим $J_3 = \tilde{\beta}(w_0^+ - w_0^-)(0)$. Используя (47), имеем, что ($s = n/p + \varepsilon_0$)

$$|J_3| \le \left|\tilde{\beta}(0)\right| \left(\| \varphi_{0i} w_0 \|_{W_p^s(U^+)} + \| \varphi_{0i} w_0 \|_{W_p^s(U^-)} \right) \le c_7 \| \varphi_{0i} w_0 \|^{\theta}_{W_p^2(U^+)} \| \varphi_{0i} w_0 \|^{1-\theta}_{L_0(U^+)} + \| \varphi_{0i} w_0 \|^{\theta}_{W_p^2(U^-)} \| \varphi_{0i} w_0 \|^{1-\theta}_{L_0(U^-)} \le c|\lambda|^{\theta - 1 + s_0 + 3\varepsilon_0} |\vec{\alpha}_1 - \vec{\alpha}_2|. \quad (70)$$

Таким образом,

$$|J_3| \le c_8 |\lambda|^{-1/2 + (n-1)/2p + 7\varepsilon_0/2} |\vec{\alpha}_1 - \vec{\alpha}_2|. \quad (71)$$

Окончательная оценка, как вытекает из (71), (68), (69), имеет вид

$$\| R(\vec{\alpha}_1) - R(\vec{\alpha}_2) \|_{\widetilde{W}_p^{s_0}(0,\tau)} \le c_{10} \lambda^{\gamma_0} |\vec{\alpha}_1 - \vec{\alpha}_2|,$$

причем в силу условия $p > n$, число γ_0 (минимальное из постоянных в (66), (69), (70)) отрицательно, если параметр ε_0 достаточно мал. Условие $\varepsilon_0 < 1/15p$ это гарантирует. Возьмем в качестве λ_5 число со свойством $\lambda_5 \ge \lambda_4$, $c_{10}\lambda^{\gamma_0} \le 1/2$. В этом случае при $\lambda \ge \lambda_5$ оператор R переводит шар B_{R_0} в себя и является в нем сжимающим. Следовательно, уравнение (36) имеет решение $\vec{\alpha}$. Используя найденное решение $\vec{\alpha}$, найдем решение v задачи сопряжения (21)-(23).

Покажем, что у нас выполнены условия переопределения (23). Взяв равенства (39) в точке $z' = 0$ и вычитая первое равенство (с учетом второго при $i > r_1$) из соответствующих равенств (40), (41), получим

$$b_n(0)(w_{iz_n}(0) - v^+_{z_n}(x^i(0))) = \alpha(\tilde{\psi}_i(t) - v^+)(x^i(0)), i = 1,2, \dots, r_1, \quad (72)$$

$$b_n(0)(w_{iz_n}(0) - v^-_{z_n}(x^i(0))) = \alpha(-\tilde{\psi}_i(t) + v^-)(x^i(0)), i = r_1 + 1, \dots, r, \quad (73)$$

Функции $\omega_i^+(z)$ $(i \le r_1)$ и $\omega_i^-(z)$ $(i > r_1)$ удовлетворяют уравнению (34). Возьмем в этом уравнении $z' = 0$ и вычтем его из равенства (35) при $i \le r_1$ и из (36) при $i > r_1$.

Вычитая равенства (26) из (27), (28), получим

$$-b^+_{nn}(0, z_n)(w_{iz_nz_n} - \omega^+_{iz_nz_n}(0, z_n)) + \lambda(w_{iz_nz_n} - \omega^+_{iz_nz_n}(0, z_n)) = 0, i \le r_1, \quad (74)$$

$$-b^-_{nn}(0, z_n)(w_{iz_nz_n} - \omega^-_{iz_nz_n}(0, z_n))) + \lambda(w_{iz_nz_n} - \omega^-_{iz_nz_n}(0, z_n)) = 0, i \le r_1, = 0, i > r_1. \quad (75)$$

Функции $w_i(z_n) - \omega_i^+(0, z_n)$ при $i = 1, \dots, r_1$ и $w_i(z_n) - \omega_i^-(0, z_n)$ при $r > r_1$ при $z' = 0$ удовлетворяют уравнениям (26), вычитая которые из соответствующих уравнений (27), (28), придем к равенствам

$$b_n(0)(w_{iz_n}(0) - \omega^+_{iz_n}(0)) = \beta(w_i(0) - \omega_i^+(0)), w_i(\delta_1) - \omega_i^+(0, \delta_1) = 0,$$

$$b_n(0)(w_{iz_n}(0) - \omega^-_{iz_n}(0)) = \beta(\omega_i^-(0, z_n) - w_i(0)), w_i(-\delta_1) - \omega_i^+(0, -\delta_1) = 0,$$

где в первом равенстве $i = 1,2, \dots, r_1$ и во втором $i = r_1 + 1, \dots, r$. Выбирая параметр λ, если необходимо, можем считать, что решение смешанных начально-краевых задач единственно, и тогда $w_i(z_n) = \omega_i^+(0, z_n)$ при $i = 1, \dots, r_1$ и $w_i(z_n) = \omega_i^-(0, z_n)$ при $i = r_1 + 1, \dots, r$.

Теорема 4. Пусть выполнены условия (5), (9)-(15), (20), (24). Тогда задача (1)-(4) об определении решения $(u, \beta_1, \dots, \beta_r)$ фредгольмова, т. е. из теоремы единственности вытекает теорема существования решений в заданном классе, описанном в теореме 3.

Замечание 1. Вообще говоря, граница Γ области может состоять из нескольких компонент связности, в этом случае мы можем брать различные граничные условия на каждой из них. Утверждения теорем 1, 2, 3 останутся справедливыми. В случае если граница Γ_0 состоит из нескольких компонент связности $\Gamma_0 = \cup \Gamma_i$, на каждой из которых задано условие сопряжения вида (8) и ищутся соответствующие функции β_i, входящие в условие сопряжения того же вида, что и в теореме 3, то утверждение теоремы 3 также остается справедливым при выполнении соответствующих условий на данные.

Заключение

В работе рассмотрен вопрос о корректности в пространствах Соболева стационарных обратных задач определения коэффициента теплообмена на границе раздела сред, входящего в условие сопряжения типа неидеального контакта. Доказаны теоремы существования и единственности решений. Получены априорные оценки на решение, гарантирующие его устойчивость по отношению к данным задачи. Задача сводится к интегральному уравнению с оператором типа Вольтерры, который имеет малую норму при малых временах. Показано, что метод последовательных приближений сходится. Это уравнение можно использовать и при численном определении решения. Таким образом, метод является конструктивным, и на основе предложенного подхода возможно построение численных алгоритмов решения задачи.

Список литературы

1. Baehr, H. D. Heat and Mass Transfer / H. D. Baehr, K. Stephan. – Berlin : Springer-Verlag, 2006. – 710 p.

2. Ладыженская, О. А. Линейные и квазилинейные уравнения параболического типа / О. А. Ладыженская, Н. Н. Уральцева, В. А. Солонников. – Москва : Наука, 1968 – 736 с. – Текст : непосредственный.

3. Ладыженская, О. А. Линейные и квазилинейные уравнения эллиптического типа / О. А. Ладыженская, Н. Н. Уральцева. – Москва : Наука, 1973 – 575 с. – Текст : непосредственный.

4. Алифанов, О. М. Обратные задачи в исследовании сложного теплообмена / О. М. Алифанов, Е. А. Артюхин, А. В. Ненарокомов. – Москва : Янус-К, 2009 – 299 с. – Текст : непосредственный.

5. Ткаченко, В. Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов / В. Н. Ткаченко. – Киев : Наукова думка, 2008. – 243 с. – Текст : непосредственный.

6. Манапова, А. Р. О конечно-разностном методе решения задачи Дирихле для нелинейных эллиптических уравнений с условиями неидеального контакта / А. Р. Манапова. – Текст : непосредственный // Вестник Башкирского университета. – 2015. – № 3 (20). – С. 795–811.

7. Ravshanov, N. D. Numerical modeling of the filtration problem of oil and gas in three-layer porous medium / N. D. Ravshanov, Yu. N. Islomov, M. Kukanova // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2016. – № 1 (3). – С. 29–45.

8. Bryan, K. Reconstruction of cracks with unknown transmission condition from boundary data / K. Bryan, F. R. Ogborne, M. Vellela // Inverse Problems. – 2005. – № 1 (21). – P. 21–36.

9. Problems of heat mass and charge transfer with discontinuous solutions / V. F. Demchenko, V. O. Pavlyk, U. Dilthey [et al.] // European Journal of Applied Mathematics. – 2011. – № 4 (22). – P. 365–380.

10. Huang, C. An inverse problem of simultaneously estimating contact conductance and heat transfer coefficient of exhaust gases between engine's exhaust valve and seat / C. Huang, T. Ju // International journal for numerical methods in engineering. – 1995. – № 1 (38). – P. 735–754.

11. Loulou, T. An inverse heat conduction problem with heat flux measurements / T. Loulou, E. Scott // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2006. – № 67 (11). – P. 1587–1616.

12. Identification of contact failures in multi-layered composites / A. Abreu, H. R. B. Orlande, C. P. Naveira-Cotta [et al.] // Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2011 August 28-31. – 2011. – P. 1–9.

13. A comparison of two inverse problem techniques for the identification of contact failures in multi-layered composites / A. Abreu, M. J. Colaco, C. J. S. Alves [et al.] // 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013) November 3-7. – 2013. – P. 5422–5432.

14. Ладыженская, О. А. О классической разрешимости задач дифракции для уравнений эллиптического и параболического типов / О. А. Ладыженская, В .Я. Ривкинд, Н. Н. Уральцева. – Текст : непосредственный // Доклады АН СССР. – 1964. – № 3 (158). – С. 513–515.

15. Ладыженская, О. А. О классической разрешимости задач дифракции / О. А. Ладыженская, В. Я. Ривкинд, Н. Н. Уральцева. – Текст : непосредственный // Труды МИАН СССР. – 1966. – № 1 (92). – С. 116–146.

16. Олейник, О. А. Об уравнениях эллиптического и параболического типа с разрывными коэффициентами / О. А. Олейник. – Текст : непосредственный // Успехи математичских наук. – 1959. – № 5 (14). – С. 164–166.

17. Олейник, О. А. Краевые задачи для линейных уравнений эллиптического и параболического типа с разрывными коэффициентами / О. А. Олейник. – Текст : непосредственный // Известия Академии Наук СССР. Серия математическая. – 1961. – № 1 (25). – С. 3–20.

18. Шефтель, З. Г. Разрешимость в Lp и классическая разрешимость общих граничных задач для эллиптических уравнений с разрывными коэффициентами / З. Г. Шефтель. – Текст : непосредственный // Успехи математичских наук. – 1964. – № 4 (19). – С. 230–232.

19. Шефтель, З. Г. Оценки в Lp решений эллиптических уравнений с разрывными коэффициентами, удовлетворяющих общим граничным условиям и условиям сопряжения / З. Г. Шефтель. – Текст : непосредственный // Доклады АН СССР. – 1963. – № 1 (149). – С. 48–51.

20. Schechter, M. A. Generalization of the problem of transmission / M. A. Schechter // Annali della Scuola Normale Superiore di Pisa. Classe di Scienze. – 1960. – № 3 (14). – P. 207–236.

21. Житарашу, Н. В. Априорные оценки и разрешимость общих краевых задач / Н. В. Житарашу. – Текст : непосредственный // Доклады АН СССР. – 1965. – № 1 (165). – С. 24–27.

22. Qamlo, A. H. Boundary Control for 2×2 elliptic systems with conjugation conditions / A. H. Qamlo, B. G. Mohammed // Intelligent Control and Automation. – 2013. – № 1 (4). – P. 280–286.

23. Шадрина, Н. Н. О разрешимости некоторых задач сопряжения для уравнений эллиптического типа / Н.Н. Шадрина. – Текст : непосредственный // Математические заметки СВФУ. – 2014. – № 1 (21). – С. 75–89.

24. Шадрина, Н. Н. О влиянии параметров на разрешимость некоторых задач сопряжения для эллиптических уравнений / Н. Н. Шадрина. – Текст : непосредственный // Сибирские электронные математические известия. – 2016. – № 1 (13). – С. 411–425.

25. Трибель, Х. Теория интерполяции. Функциональные пространства. Дифференциальные операторы / Х. Трибель. – Москва : Мир, 1980. – 664 с. – Текст : непосредственный.

26. Белоногов, В. А. О разрешимости задач сопряжения с условиями типа неидеального контакта / В. А. Белоногов, С. Г. Пятков – Текст : непосредственный // Известия вузов. Математика. – 2020. – № 7. – С. 18–32.

27. Denk, R. Optimal $L_p - L_q$-estimates for parabolic boundary value problems with inhomogeneous data / R. Denk, M. Hieber, J. Prüss // Mathematische Zeitschrift. – 2007. – № 1 (257). – P. 193–224.

28. Amann, H. Compact embeddings of vector-valued Sobolev and Besov spaces / H. Amann // Glasnik matematicki. – 2000. – № 1 (35). – P. 161–177.

29. Михайлов, В. П. Дифференциальные уравнения в частных производных / В. П. Михайлов. – Москва : Наука, 1976. – 390 с. – Текст : непосредственный.

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 г. Выпуск 1 (64). С. 118–133

УДК 574.45:546.26 (571.122)
DOI: 10.18822/byusu202201118-133

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ХМАО-ЮГРЕ С ПОМОЩЬЮ УГЛЕРОДНЫХ КАРТ

Бредихин Арсентий Игоревич
магистрант Института цифровой экономики
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»,
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: bredihin.igorr@yandex.ru

Ханты-Мансийский автономный округ – Югра обладает большой площадью лесных территорий. А лесная растительность, как и любая растительность, естественным образом рано или поздно отмирает, вследствие чего из органического вещества происходит выделение углекислого газа в атмосферу. Данный факт ведет к усилению парникового эффекта и усилению глобального потепления. Для того чтобы не допустить повышения глобальной температуры, необходимо оценивать запас углерода в виде количества растительной биомассы, поскольку более 90 % территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (ХМАО-Югра) покрыто лесами. Одним из способов оценки растительной биомассы является создание так называемых углеродных карт с применением методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и машинного обучения. Применение полученных с помощью методов ДЗЗ спутниковых снимков и методов их обработки позволит получить карту округа с полным охватом всей территории, а применение моделей машинного обучения позволит разработать модель, с помощью которой будет возможно создавать углеродную карту округа.

В данной работе приведен обзор существующих решений в области ДЗЗ и машинного обучения, направленных на создание углеродных карт. На основании данного обзора предложена программа исследований, которая позволит разработать подход, позволяющий получать цифровую углеродную карту ХМАО с заданной точностью.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, спутник, лидар, изображение, углерод, растительность, биомасса, машинное обучение, регрессионная модель

AN APPROACH TO THE ASSESSMENT OF CARBON RESERVES IN KHMAO-YUGRA USING CARBON MAPS

Arsentiy I. Bredihin
Master Student at the Institute of Digital Economy,
Yugra State University
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: bredihin.igorr@yandex.ru

Khanty-Mansi Autonomous Okrug-Yugra has a large area of forest territories. And forest vegetation, like any vegetation, naturally dies sooner or later, as a result of which carbon dioxide is released into the atmosphere from organic matter. This fact leads to an increase in the greenhouse effect and an increase in global warming.

In order to prevent an increase in global temperature, it is necessary to estimate the carbon stock in the form of the amount of plant biomass, since more than 90% of the territory of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug-Yugra (KhMAO-Yugra) is covered with forests.

One of the ways to assess plant biomass is to create so-called carbon maps using remote sensing of the Earth (remote sensing) and machine learning methods.

This paper provides an overview of existing solutions in the field of remote sensing and machine learning aimed at creating carbon maps. Based on this review, a research program has been proposed that will allow us to develop an approach that allows us to obtain a digital carbon map of the KhMAO with a given accuracy.

Keywords: Remote sensing, satellite, lidar, image, carbon, vegetation, biomass, machine learning, regression model

Введение

Ханты-Мансийский автономный округ – Югра является крупным нефте- и газодобывающим российским регионом. Он характеризуется большими объемами выбросов парниковых газов в атмосферу. Так, на территории округа имеется большое количество болот, которые являются источником метана (CH_4), а нефте- и газодобыча – источником диоксида углерода (CO_2).

Для недопущения повышения глобальной температуры необходимо вести учет запасов углерода. Помимо выбросов от сжигания топлива, диоксид углерода (CO_2), который является парниковым газом, образуется при разложении мертвой растительности, поскольку растения накапливают и хранят в себе углерод. При этом Ханты-Мансийский автономный округ – Югра (ХМАО-Югра) обладает большой площадью лесов: по состоянию на 2020 год она составляет 503 990 км^2 при общей площади территории округа в 534,8 тыс. км^2 [1, с. 608-610], что составляет 94,2 % площади всего округа. Поэтому для учета запаса углерода в рамках округа необходимо оценить данный запас в виде количества растительной (лесной) биомассы.

Одним из способов оценки лесной биомассы округа является применение спутниковых изображений оптического и инфракрасного диапазонов совместно с лидарными снимками. Здесь примечательным является подход к решению данной задачи американскими учеными [2], который основан на применении полевых измерений с совместными данными НАСА (лидар GLAS со спутника ICESat).

Суть подхода заключается в последовательном получении полевых измерений – массы деревьев на определенных участках, определении согласованности данных с сигналами лидара для данных участков, обучении модели «случайный лес» на отдельных участках карты и вычислении с ее помощью биомассы на остальных участках карты.

В работе [2] описана усовершенствованная версия данного подхода из статьи [3]. В обоих случаях тот же коллектив ученых разрабатывал модели в континентальном масштабе – для Африки, Азии и Южной Америки и использовал для этого изображения MODIS с разрешением 500 м. В последней версии подхода ученым удалось объяснить с помощью полученной модели 83 %, 78 % и 71 % различий в биомассе для тропической Америки, Африки и Азии соответственно.

Однако для нашего случая подход необходимо модифицировать. Ведь разрешение изображений в 500 м оказывается недостаточным для построения углеродной карты в рамках региона РФ. В качестве альтернативы необходимо использовать снимки с большим разрешением, например Landsat-7/8 (разрешение 30-60 м), WorldWiew3 (разрешение 3,7 м). Также следует принять во внимание тот факт, что различия в видах растительности, обусловленные различиями климата, также могут влиять на точность модели (авторы [2] создавали модели для экваториальных и тропических регионов, тогда как ХМАО-Югра расположена в таежной зоне или зоне резко континентального климата).

К тому же данный подход обладает следующими ограничениями: он не учитывает углерод, хранящийся в почве, травянистую и кустарниковую растительность и предполагает полное выделение CO_2 в атмосферу, в то время как на практике это происходит не всегда [2].

Данная статья рассматривает проблему получения углеродной карты. Она разбита на 3 части: в первой части будут подробно рассмотрены методы сбора полевых данных и преоб-

разования их в значения биомассы. Вторая часть будет посвящена анализу сигналов лидара и проверке согласованности полевых данных с метриками сигналов лидара. В третьей части будет уделено внимание построению модели машинного обучения для вычисления значений биомассы различных участков будущей углеродной карты округа. На протяжении всей работы будут приводиться предложения по изменению подхода к созданию углеродных карт для адаптации его к условиям северного региона.

Сбор полевых данных

Сбор полевых данных является первым этапом создания углеродной карты. Для начала выбираются участки, соответствующие «пятнам» лидара GLAS.

«Пятна», т. е. отпечатки лидара GLAS, имеют диаметр около 70 метров и расположены на расстоянии 170 метров друг от друга. Съемка ведется вдоль поверхности Земли с помощью двух каналов с длинами волн 532 и 1064 нм [4]. Также в [2] упоминается, что одно «пятно» GLAS встречается примерно на каждых 6 км^2 земной поверхности, что для территории ХМАО соответствует ~89 тысячам снимков в среднем. Согласно данным из [5], архив данных лидара GLAS за 3 года (с 10.2018 по 01.2022) содержит примерно 5468 файлов общим размером ~11 Тб для территории ХМАО. Данные загружаются с периодичностью в 3 месяца; количество получаемых для территории ХМАО наборов данных (датасетов) составляет от 4 до 6 в день.

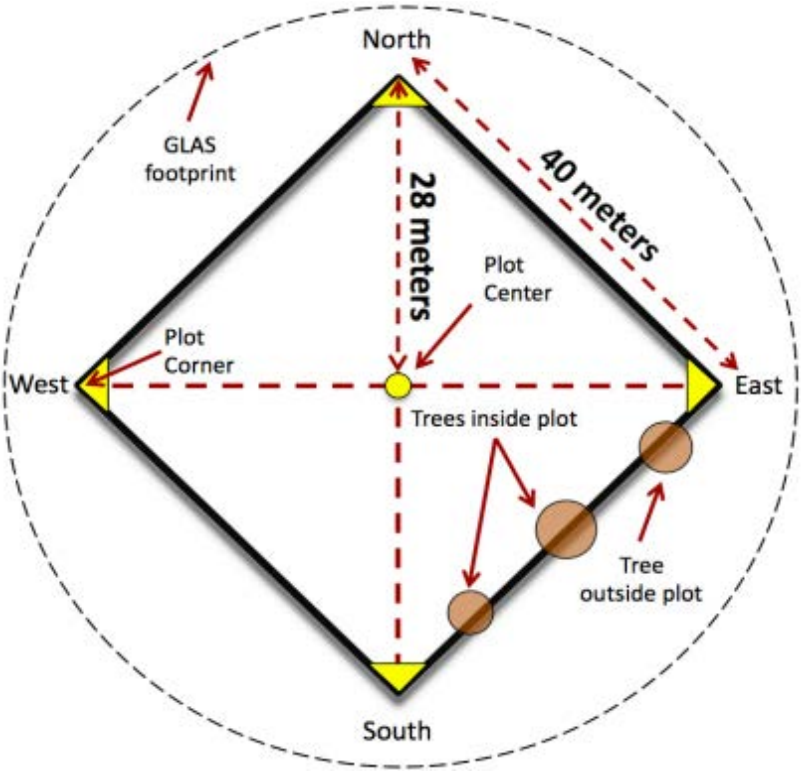


Рисунок 1. Схема выбора участка в «пятне» лидара GLAS [3]

Замечание. В работе [3] используются датасеты, в которых диаметр «пятен» равен 65 м; участок имеет форму квадрата со сторонами 40 м.

Затем выбираются участки лесных массивов, целиком лежащие в «пятнах» лидара GLAS. После чего в границах каждого участка измеряется диаметр ствола всех деревьев на высоте 1,3 м от земли. При вычислении биомассы деревьев используется среднее значение удельного веса дерева (плотность) на основе вида.

В работе [2] для оценки биомассы предлагается регрессионная модель следующего вида:

$$\ln(AGB) = \alpha + \beta_1 \ln(D) + \beta_2 \ln(H) + \beta_3 \ln(\rho), \quad (1)$$

где *AGB* – значение биомассы (англ. above-ground biomass), *D* и *H* – диаметр и высота дерева, а ρ – плотность древесины. Кроме того, здесь же выделяются следующие 6 видов данной модели:

1. Все 4 параметра модели (1) настраиваются независимо для различных типов лесов.
2. Аналогично предыдущей модели с предположением, что параметры модели не меняются в зависимости от типа леса.

Выделяются и модели, зависящие только от массы отдельных деревьев (переменная $\rho D^2 H$):

1. Модель вида $\ln(AGB) = \alpha + \beta_1 \ln(\rho D^2 H)$.
2. Аналогично предыдущей модели с тем же предположением.
3. Модель вида $\ln(AGB) = \alpha + \ln(\rho D^2 H)$.
4. Аналогично предыдущей модели с тем же предположением.

Однако на практике высота дерева не всегда доступна. Поэтому, как считают авторы [2], необходимо отойти от ее использования в модели:

$$\ln(AGB) = \alpha + b\ln(D) + c(\ln(D))^2 + d(\ln(D))^3 + \beta_3 \ln(p). \quad (2)$$

При логарифмировании данных окончательная оценка будет смещаться, и, таким образом, нескорректированные оценки биомассы будут недооценивать реальные значения. Поэтому оценку необходимо умножать на поправочный коэффициент:

$$CF = exp\left(\frac{RSE^2}{2}\right), \quad (3)$$

где RSE – метрика полученной модели (англ. root square error – корень квадратичной ошибки).

Авторы [2] утверждают, что разновидности данной модели в основном применяются для оценки биомассы широколиственных и тропических деревьев. Что же касается лесов ХМАО (тайга, тундра), то в данном случае необходимо провести собственные измерения и определить более точные регрессионные модели для данного случая. В случае приемлемого значения ошибки полученной регрессионной модели ее можно будет применять для вычисления массы дерева в зависимости от диаметра и плотности, а также для проверки согласованности полученных полевых данных с метриками сигналов лидара GLAS.

Лидары применяются для оценки биомассы и в аналогичных исследованиях. Так, в работе [6] авторы применяют гиперспектральные и лидарные данные для оценки биомассы кукурузы. Однако вместо спутниковых лидаров используется бортовой лидар Leica с дискретным возвратом, предназначенный для съемок на малой высоте. В данной работе упоминается об ограничении применения лидарных данных в случае густой растительности, об ограничении применения самих лидаров дискретного возврата, поскольку они регистрируют только один возврат для каждого испускаемого импульса в районах с низкорослой растительностью, а также о невозможности использования лидара для анализа спектральных характеристик растительного покрова, поскольку лидары работают на одной длине волны.

При этом в работе [6] процедура полевых измерений схожа с таковой в работе [3]. Для этого на участках 4*4 м^2 измерялись высота и масса стеблей кукурузы, а также индекс площади проективного покрытия листьев (LAI) с помощью портативного прибора LAI-2200. При этом биомасса кукурузы вычислялась с помощью регрессионного уравнения, полученного опытным путем. Для оценки способности регрессионных моделей к обобщению применяется метод машинного обучения под названием «кросс-валидация без исключения» (leave-one-out), чего нет в подходе из работы [3].

Об ограниченности применения данных лидаров дискретного возврата упоминается и в работе [7], которая посвящена оценке биомассы хвойных лесов. Как утверждают авторы, с помощью индексов проникновения лазера не может быть точно оценен покров полога.

Способ получения полевых измерений в работе [7] полностью аналогичен основной работе ([3]), с тем отличием, что дополнительно измеряется высота дерева с помощью лазерного гипсометра. Там же приведены аллометрические уравнения, которые учитывают еще и высоту дерева. При этом уравнения предназначены для определения биомассы ствола, ветвей, листьев и плодов (sic!) дерева.

В работе [8] применяются лидарные данные и гиперспектральные изображения для определения влияния размера выбранного участка на точность определения биомассы. Причем оценивается не только надземная, но еще и подземная биомасса.

Работа [9] посвящена разработанному авторами методу оценки объема ствола под названием Outer Hull Model – OHM. Данный метод применяется для оценки биомассы отдельных деревьев, что в нашем случае может быть слишком затратно. В данной работе используется надземный лидар с разрешением 6 мм. Здесь в полевых измерениях измеряются не использовавшиеся ранее характеристики отдельного дерева (сосны): высота достижения диаметра основного ствола в 4 дюйма (10,16 см), корона (расстояние между первой ветвью и высоты достижения диаметра ствола). Метод измерения характеристик дерева, в отличие от остальных работ, здесь связан со сбором компонентов дерева (ветви) и их дальнейшей обработкой (высушивание). Согласно полученным в [9] результатам, для хвойных деревьев биомасса хвои и ветвей дерева может достигать до 20 % биомассы всего дерева.

В работе [10], посвященной оценке лесной биомассы, используются полученные в ходе миссии GEDI лидарные данные. Миссия GEDI была начата сравнительно недавно на момент публикации данной статьи – 5 декабря 2018 г. Согласно данным из [11], лидар миссии GEDI установлен на Международной космической станции (МКС) и собирает данные в диапазоне с 51.6 ю.ш. до 51.6 с.ш. В нашем случае данный лидар не подойдет, поскольку самая южная точка ХМАО имеет координату ~58 35' с.ш. К тому же разрешение лидара GEDI слишком грубó для нашего случая – 1 км. Упоминается и об оптимальном разрешении снимков для создания углеродных карт – оно принято равным 100 м.

В работе [12] процедура сбора полевых данных также ничем не отличается от таковых в рассмотренных работах. В ней упоминается об использовании значения диаметра дерева на уровне груди в 10 см. Авторы [12] утверждают, что это значение может быть слишком велико, поскольку на деревья с меньшим диаметром может приходиться значительная доля биомассы (произведена оценка биомассы в Кении). Здесь также приводятся аллометрические уравнения для разнородных лесных участков, указаны справочные материалы для определения плотности древесины, а также упоминается о способе определения положения центра участка (лидарного «пятна») с помощью GNSS-приемника (Trimble GeoXH).

Работа [13] посвящена оценке лесной биомассы на острове Калимантан. В данной работе представляет интерес необычный подход к определению биомассы на участке – он основан на методе Монте-Карло. Авторы работы вносят погрешности в характеристики деревьев (высота, диаметр, плотность), предполагая, что в ходе измерений данных характеристик могут возникать ошибки, связанные с неточностью измерения или отсутствием необходимых справочных данных (таксономическая информация, плотность древесины). Для приемлемого уровня надежности, как утверждают авторы [13], достаточно по 100 оценок на каждое дерево. Здесь метод Монте-Карло применяется и для учета возможных ошибок при определении координат участка в «пятне» лидара.

Работа [14] в этом списке стоит особняком: здесь описывается подход к оценке биомассы травянистой растительности, растущей вблизи болот. Процедура сбора полевых данных отличается от таковой для деревьев: трава срезается с определенной площади, высушивается при 55 °C и затем взвешивается, после чего определяется плотность отдельного вида болотной растительности. В отличие от вычисления биомассы лесов здесь не требуется использование лидарных данных.

Работа [15] также отличается от остальных: в ней описывается подход оценки биомассы в урбанизированных территориях. Особенность данного подхода заключается в использовании высокоточных спутниковых снимков (разрешение 5 м), а для измерения высоты деревьев при сборе полевых данных используется лазерный высотомер. Подход включает в себя метод стратификации лидарных снимков, т. е. деление снимков на слои по высоте.

Исходя из представленного обзора методов сбора полевых данных, можно видеть, что во всех работах получение данных о растительности связано либо с измерениями на местах (де-

ревья), либо со сбором и обработкой образцов растительности (трава). При агрегировании данных о биомассе наиболее подходящим в нашем случае способом агрегации данных является вычисление среднего значения биомассы по классам растительности аналогично проделанным действиям в работах [3, 15].

Анализ сигналов лидара

Следующий этап создания углеродной карты – анализ формы сигнала лидара GLAS. Это необходимо для установления статистической взаимосвязи между полевыми оценками плотности надземного углерода (англ. aboveground carbon density, ACD). В работе [2] предполагается, что отношение массы углерода к общей биомассе составляет 1:2.

Здесь же подробно изложен процесс анализа «пятен» лидара GLAS. Так, перед непосредственной обработкой данных авторы отбросили «пятна», которые:

- имеют менее 2 пиков;
- имеют максимальную высоту, превышающую шум менее чем в 2 раза;
- имеют расхождение со значениями высоты от SRTM более 25 м.

Подробное описание алгоритма оценки биомассы по снимкам лидара (LVIS) дано в работе [16].

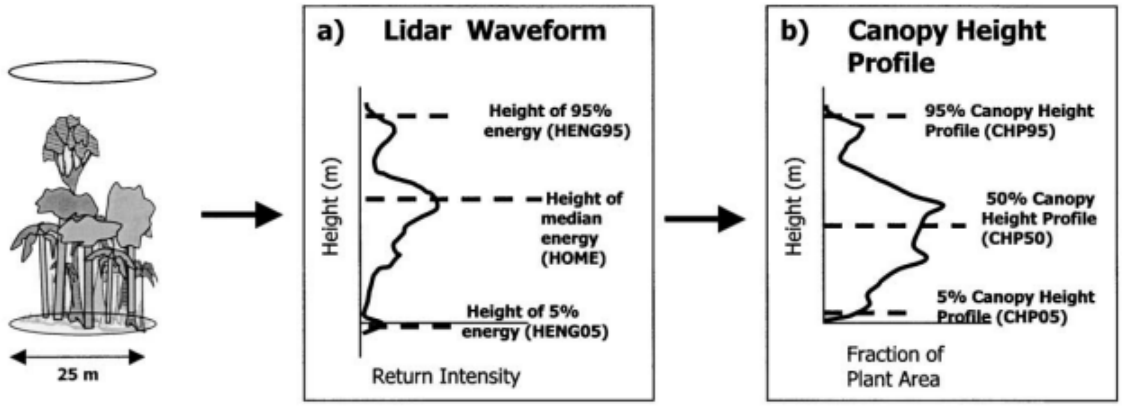


Рисунок 2. Схема оценки биомассы по снимку лидара [16]

Как видно из рисунка 2, сигнал с лидара (a) переводится в профиль высоты покрова (b). При этом используется методика из статьи [17]. По сути, дальнейший анализ «пятна» лидара связан с анализом гистограммы профиля покрова.

Методика перевода сигнала с лидара в профиль высоты покрова из статьи [17] состоит из следующих шагов:

1. Определение и отсечение шума. Сводится к последовательному вычислению значений среднего арифметического и дисперсии шума в части сигнала, которая соответствует «отрицательной высоте», генерации сигнала с заданными значениями среднего и дисперсии и последующему его вычитанию из исходного сигнала.
2. Сглаживание функции и вычисление кумулятивной «функции покрова».
3. Преобразование кумулятивной «функции покрова» по методологии МакАртура-Хорна (применение формулы *-ln[1-closure]*, где *closure* – полученная на предыдущем шаге «функция покрова»).
4. Нормализация функции и обратное преобразование ее в плотность вероятности.

Схема методики показана ниже.

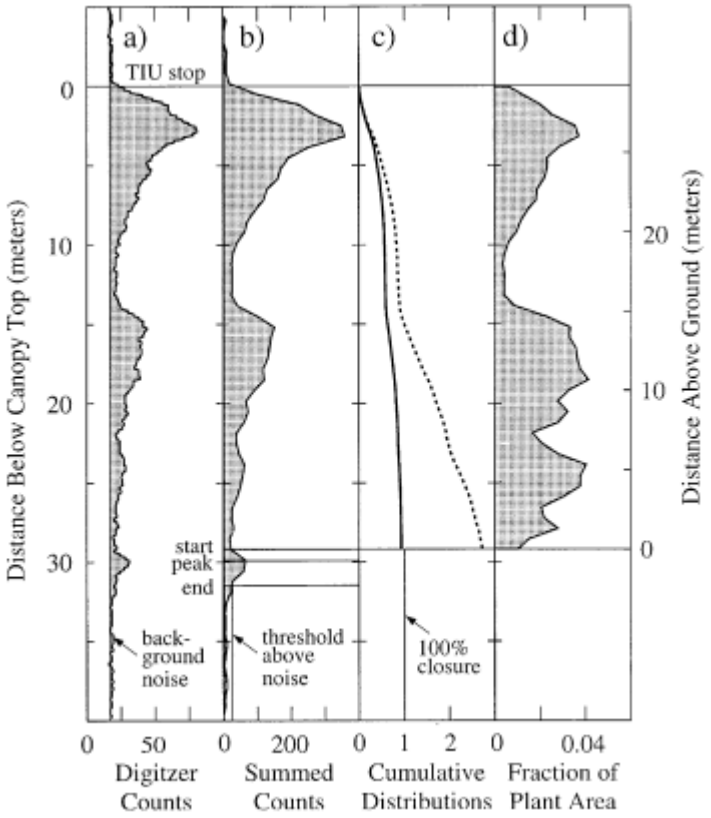


Рисунок 3. Схема перевода сигнала лидара в профиль высоты покрова [17]

Профиль высоты покрова является не чем иным, как функцией плотности распределения высот в «пятне» лидара. Далее из профиля высоты извлекаются следующие значения:

- H_p – значения p-го перцентиля функции распределения высот. Используемые значения p: 10, 25, 30, 40, 60, 75, 90;
- *HOME* – медианное значение высоты;
- *MAXPEAKHT* – максимальное значение высоты;
- *CANOPY_ENE* – интеграл функции высоты от начала сигнала (поверхность земли) до *MAXPEAKHT*.

Данные значения применяются для построения регрессионной модели, которая имеет следующий изначальный вид: (0 + *HOME* + *HEIGHT2* + *H10* + *H25* + *H30* + *H40* + *H60* + *H75* + *H90* + *MAXPEAKHT* + *CANOPY_DEP* + *CANOPY_ENE*).

Замечание. Авторы [5] не посчитали нужным указать смысл независимых переменных *HEIGHT2* и *CANOPY_DEP*, поскольку в их регрессионной модели значимыми оказались только переменные *HOME*, *H10*, *H25*, *H60*, *CANOPY_ENE*.

Применение вышеописанных алгоритмов в работе [3] позволило получить по 2 значения биомассы на каждый участок, по которым была построена линейная регрессионная модель. Проверка модели с помощью статистического теста на несоответствие, основанного на локальной взвешенной регрессии (LOWESS), подтвердила правильность выбора именно линейной модели и показала хорошую согласованность модели с данными.

В других работах по составлению карты плотности углерода проводились аналогичные исследования по установлению связи между полевыми данными биомассы и метриками формы сигнала лидара. В работе [7], в отличие от подхода из [3], при анализе лидарных данных для каждого «пятна» вместо профиля высоты создается цифровая модель земной поверхности с помощью воксельного подхода. Пространство, в котором находятся формы сигналов, разделяется на воксели, а затем каждому вокселю присваивается максимальное значение амплитуды среди всех амплитуд в пределах одного и того же вокселя.

А в работе [8] для получения цифровой модели земной поверхности используется метод интерполяции триангулированной нерегулярной сети. Цифровая модель земной поверхности, так же как и в аналогичных работах, используется для калибровки сигналов лидара, поскольку для получения модели высоты растительного покрова необходимо использование двух источников данных: карты высот земной поверхности и самих лидарных снимков. Более подробно подход составления цифровой модели высоты покрова описан в [21].

Также в [8] рассматриваются различные метрики показателей лидара. Упоминается об обычно используемых лидарных показателях для оценки биомассы растительности: процентили, максимумы, средние значения и стандартные отклонения высоты лидара и индекс лазерного перехвата (LII). Проведено исследование, в котором протестирован ряд лидарных показателей для получения оптимальной модели оценки биомассы.

Упоминается в работе [8] и о влиянии размера участка с лидара на точность оценки параметров растительности. Поэтому было проведено еще одно соответствующее исследование, результаты которого показали, что использование переменных размеров участков для извлечения лидарных показателей может быть полезным для точной оценки параметров растительности (использованы размеры участков от 11 до 30 м). Также определен порог высоты для отделения отдачи от полога от отдачи от земли.

В работе [9] для оценки объема ствола хвойного дерева так же, как и в работе [7], применяется воксельный подход при анализе сигналов лидара. Для обработки данных лидара применялось ПО «Faro SCENE».

При анализе сигналов лидара в работе [10] используется метод случайного объема над землей (Random Volume over Ground – RvOG), который применяется к полученным с помощью InSAR изображениям – спутник TanDEM-X (TDX) InSAR, используемый для измерения высот. Получаемые в ходе RVoG статистические значения затем применяются для настройки линейных регрессионных моделей. Авторы [10] утверждают, что метод RVoG может быть применен к любым данным «wall-to-wall».

Работа [22] представляет скорее теоретический интерес: в ней описывается трехмерная модель формы волны, которая использовалась для моделирования сигналов лидара в зависимости от структуры древостоя и характеристик датчика. В контексте данной модели крона деревьев не что иное, как рассеивающая среда, параметризованная индексом плотности листьев, коэффициентом отражения листьев, G-фактором Росса – Нильсона и коэффициентом отражения от земли.

В [22] предлагается алгоритм обработки «сырых» (raw) лидарных данных с применением формы волны сигнала и цифровой модели земной поверхности. Форма обратной волны лидара моделируется как сумма отражений в пределах «пятна» лидара диаметром 25 м, затем формы сигналов нормализуются до их максимального пика и сворачиваются ядром Гаусса.

Одним из этапов алгоритма обработки сигнала лидара является применение поисковой таблицы из 100 тыс. различных образцов сигнала лидара. Определение объема биомассы сводится к выбору наиболее близкого ко входному сигналу образца с помощью функции дистанции.

Интерес представляет сам алгоритм преобразования «сырых» лидарных данных, в то время как применение поисковой таблицы является устаревшим приемом, который в настоящий момент заменили методы машинного обучения.

Как упоминалось ранее, в работе [21] достаточно подробно описан процесс получения цифровой модели покрова, которая используется для проверки связи таких характеристик деревьев, как высота и диаметр, на высоте груди с общей биомассой. Общая модель покрова строится на основе цифровой модели поверхности (digital surface model – DSM; суть – лидарные снимки) и цифровой модели земной поверхности (digital terrain model – DTM; суть – карта высот). Строились 2 вида моделей DSM – на основе снимков лидаров с дискретным возвратом и на основе снимков лидаров полной волны. Общая модель покрова получается путем вычитания DTM из DSM; по необходимости модели DTM и DSM приводятся к единому разрешению с помощью интерполяции по методу кригинга.

Также в [21] представляет интерес процесс получения итоговой регрессионной модели для оценки объема ствола дерева: коэффициенты получены путем усреднения соответствующих коэффициентов, полученных в ходе перекрестной проверки моделей. Перекрестная проверка производилась по методу LOOCV. Общее количество деревьев на участках составило 61, а общее количество полученных моделей – 61.

В работе [12] заслуживают внимания приемы обработки лидарных данных. В ней рассказывается об обработке лидарных снимков: здания, линии электропередач и выбросы (высокие точки) фильтруются с помощью ПО Terrascan, LAStools (Rapidlasso GmbH) и ручного редактирования. Приводятся аллометрические уравнения для разнородных лесных участков, а также указаны справочные материалы для определения плотности древесины. Поиск наиболее точных регрессионных моделей производится путем перебора различных комбинаций из 1-3 предикторов (функция «regsubsets» пакета «leaps» языка программирования R).

Также заслуживают внимания метрики лидарных сигналов из работы [13]. Среди метрик лидарного сигнала используется необычная метрика – высота верхушки покрова (top canopy height – TCH). Суть метрики – отношение количества пикселей, лежащих на высоте не меньше определенной (в работе [13] – 20 м) к общему количеству пикселей. Рассматриваются модели для определения базальной площади и плотности деревьев. Для оптимизации уравнений моделей используется процедура нелинейной оптимизации L-BFGSB, реализация которой имеется в Python.

В работе [14] выполняется классификация травянистой растительности с помощью ПО eCognition и на основании объектно ориентированного подхода. В данной работе требуется другая карта для болотистой растительности, чтобы в дальнейшем свести данные из нее к разрешению спутниковых снимков. Для создания детализированной карты болотистой растительности использовались снимки NAIP с разрешением 1 м, после чего данные биомассы с первой карты были использованы для сведения полученных значений к разрешению спутниковых снимков Sentinel (разрешение 30 м). Причем вторая карта является фракционной, т. е. в пределах каждого пикселя Landsat-изображения были определены доли того или иного вида болотистой растительности.

В работе [15], как уже говорилось ранее, обработка лидарных снимков включает в себя стратификацию лидарных снимков, т. е. деления снимков на слои по высоте. В качестве моделей регрессии для оценки объема биомассы используются «бустинговые регрессионные деревья» (BRT) и пространственное авторегрессионное моделирование (spatial autoregressive modelling) для объяснения наиболее значимых переменных. Для вычисления общей биомассы используются усредненные значения биомассы по классам. Полученные в работе [15] значения коэффициентов корреляции Пирсона высоты покрова с биомассой возрастают с ростом высоты слоя: для высот 2-5 м коэффициент корреляции равен 0,3, для 5-10 м – 0,5, а для высот более 10 м – 0,7.

Исходя из представленного обзора методов обработки лидарных данных, видно, что во всех случаях применение характеристик сигналов лидара приводит к повышению точности оценки биомассы.

В ряде рассмотренных работ для определения формы растительности используются бортовые лидары [9, 12, 13] или лазерные высотомеры [15]. При этом в работе [13] утверждается, что модели оценки биомассы на основе данных бортовых лидаров показывают более высокую точность, чем модели оценки биомассы на основе данных спутниковых лидаров. В нашем случае, скорее всего, не будет возможности применения бортовых лидаров или лазерных высотомеров, поэтому в нашей задаче придется задействовать данные спутниковых лидаров, прежде всего GLAS.

Создание карты биомассы

В работе [3] создание карты плотности углерода сводится к созданию карты лесной биомассы. Разработанные для создания карт биомассы методы включают в себя:

- классификацию типов растительного покрова, где каждому классу присваивается среднее значение плотности биомассы на основе справочных оценок или данных инвентаризации весов;
- определение взаимосвязей между плотностью биомассы и характеристиками пикселей спутниковых изображений, которые могут быть отображены на больших пространствах карты.

Полученные с использованием подобного подхода карты имеют то преимущество, что обеспечивают пространственно согласованные и непрерывные значения количества биомассы, присутствующие в любой точке карты.

В работах [3, 16] для создания непрерывных карт использованы данные об отражающей способности поверхности Земли, полученные с датчиков спектрорадиометра MODIS, т. е. изображения среднего разрешения (500 м). Здесь также упоминается о том, что применение только высококачественных снимков приводит к получению изображения со значительным количеством пропусков данных. Для преодоления этого ограничения авторы [3] составили композицию из изображений, взятых за период в 2 полных календарных года.

Затем полученные на основе показателей формы сигнала лидара GLAS оценки количества углерода используются для обучения модели машинного обучения, которая оценивает биомассу как функцию показателей спектрального отражения для каждого пикселя композитного изображения.

После получения свободного от облаков композитного изображения для всех его пикселей были вычислены индексы растительности EVI2 и NDII:

$$EVI2 = 2.5 * \frac{NIR-Red}{NIR+2.4Red+1}, \quad (4)$$

где *NIR* соответствует каналу инфракрасного диапазона, а *Red* – каналу красного цвета.

$$NDII = \frac{\rho NIR-SWIR}{\rho NIR+SWIR}, \quad (5)$$

где ρNIR и *SWIR* соответствуют 8 (842 нм) и 13 каналам (2190 нм) спутникового изображения от Sentinel-2.

Кроме того, для тех же наблюдений извлечены данные о температуре поверхности суши (MODIS LST) и вычислены средние значения. Также применены данные о высоте (SRTM) с разрешением 90 м.

Таким образом, для обучения модели машинного обучения «случайный лес», которая генерирует оценки плотности углерода в каждом пикселе изображения, использовались следующие переменные:

- каналы 1, 2, 4, 5, 6, 7 спутникового изображения MODIS;
- значения отклонений в 7 канале MODIS;
- средняя температура и значения ее отклонений (LST);
- EVI2;
- NDII;
- SRTM.

В работе [2] установлено, что каналы 1 (620-670 нм) и 7 (2105-2155 нм) MODIS, скорее всего (sic!), являются наиболее важными переменными для различий в плотности углерода в надземной части. В частности, канал красного цвета позволяет отличать области с растительностью от областей без нее, а канал 7 позволяет идентифицировать регионы с высокой плотностью углерода.

Также в [2] рассмотрен вопрос применения изображений из коротковолнового ИК-диапазона для приблизительной оценки объема растительности. Здесь говорится о том, что короткие ИК-волны (каналы 6 и 7 спутника MODIS, 1628-1652 нм и 2105-2155 нм соответственно) особенно чувствительны к таким структурным параметрам растительности, как высота полога, диаметр ствола, диаметр кроны, тип растительности.

Важность применения именно ИК-изображений для анализа лесного покрова подтверждается и в других работах [18, 19, 20]. В последней [20] есть замечательная иллюстрация, демонстрирующая разделение наземной растительности от хвойных деревьев:

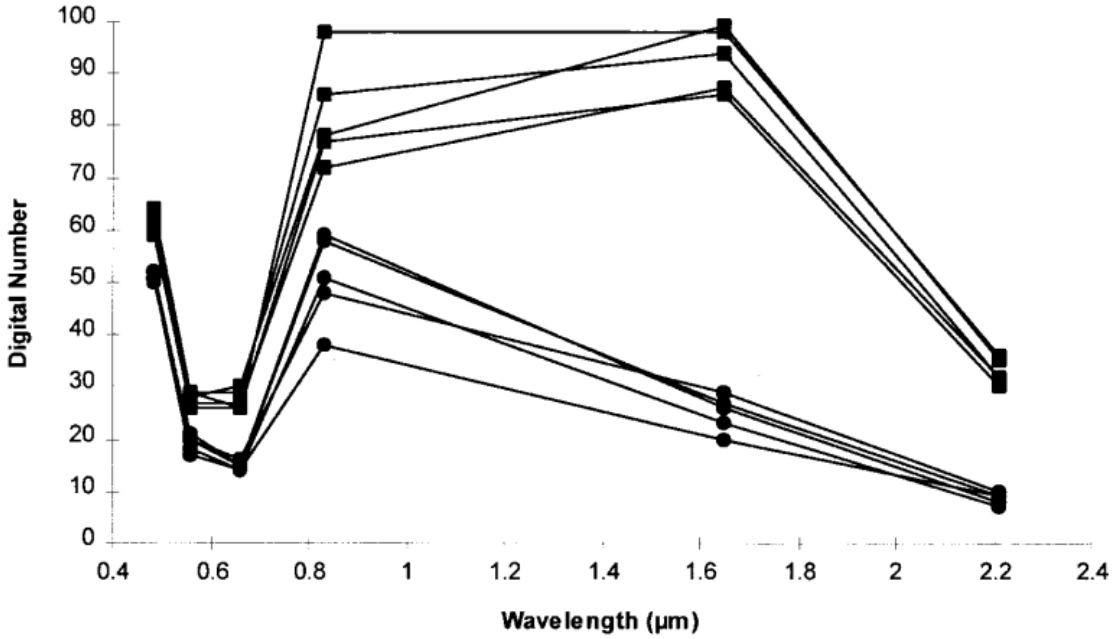


Рисунок 4. Разделимость наземной растительности от хвойных деревьев на ИК-каналах [20]

На рисунке 4 видно, что наилучшая разделимость хвойной и наземной растительности проявляется на длинах волн ~1650 нм. Как утверждается в работе [20], это обусловлено отсутствием спектральной изменчивости пикселей на ИК-изображениях, которая, однако, имеется на каналах видимого диапазона волн.

Помимо прочего, авторы [2] указали общие требования к участкам, на которых проводятся полевые измерения. Так, для всех участков, где проводились измерения, необходимо знать:

- размеры, форму и точные GPS-координаты каждого участка;
- измерения деревьев (высота стебля, диаметр);
- информацию об участках, которые располагаются более чем на одном пикселе изображения.

Здесь также говорится, что чем больше изменчивость плотности углерода в пикселе, тем больше участков необходимо взять в пределах данного пикселя. Это актуально для пикселей с изменяющимся ландшафтом (рисунок 5).

Упоминается и про необходимость использования карт с одинаковым разрешением, поскольку изменение разрешения карт может приводить к ухудшению результатов. Однако на практике доступность карт одного и того же разрешения зависит от их наличия.

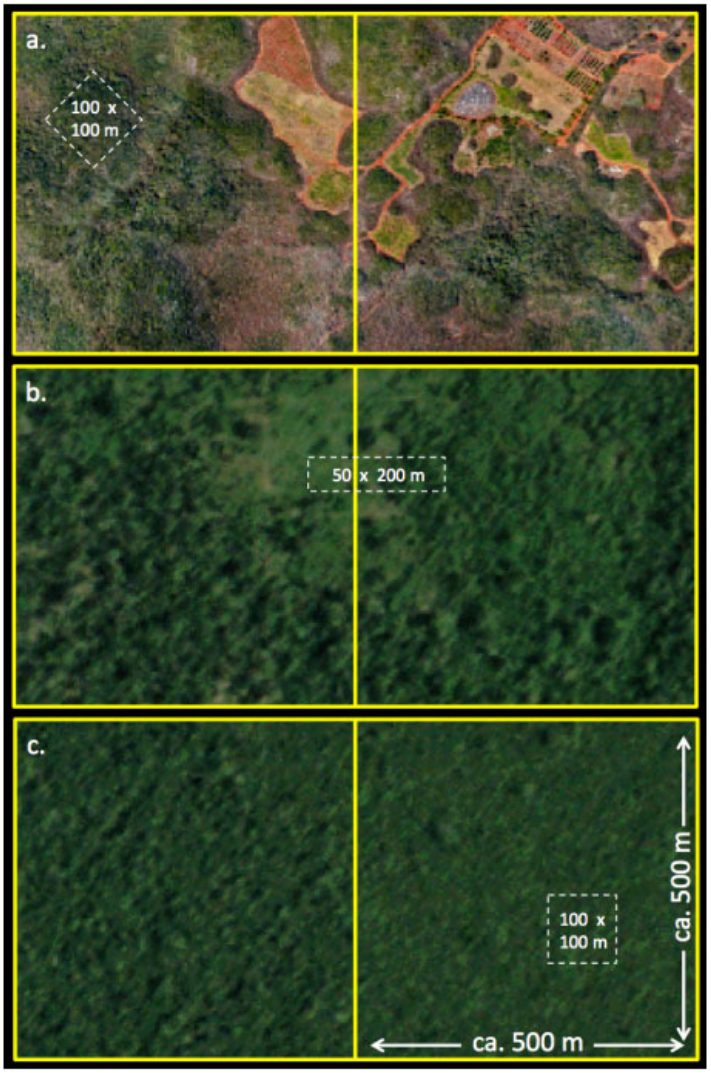


Рисунок 5. 3 различных варианта лесного ландшафта (сверху вниз): деградированный лес, деградированный густой лес, нетронутый густой лес [2]

Результаты. Как сообщается в приложении к статье [2], полученная модель случайного леса позволила объяснить 83 %, 78 % и 71 % различий в ACD на тестовых данных для тропической Америки, Африки и Азии соответственно.

В работе [6] (оценка биомассы кукурузы) проведено исследование по определению индекса растительности, дающего наибольшее значение R^2 итоговой регрессионной модели, в котором показаны очень высокие значения корреляции индексов растительности друг с другом. Также подтверждается надежность применения лидаров для оценки биомассы (R^2 = 0,835), а сочетание лидарных снимков с индексами растительности повышает значение R^2 (R^2 = 0,883).

И в работе [7] (оценка биомассы хвойных лесов) сочетание различного рода характеристик сигналов лидара приводит к повышению R^2: так, на характеристиках лидаров дискретного возврата наибольшее достигнутое значение R^2 равно 0,702, на характеристиках лидара полной волны – 0,760, а на сочетании характеристик лидаров дискретного возврата и полной волны – 0,815.

В работе [8] (оценка надземной и подземной биомассы лесов) наибольшие значения R2 для подземной/надземной/общей биомассы составили 0,742/0,874/0,860, 0,513/0,545/0,552 и 0,785/0,893/0,882 для только лидарных, только гиперспектральных и лидарных + гиперспектральных данных соответственно. Как видно из результатов, подземная биомасса различается хуже. Дополнительно показано, что логарифмирование данных полевых измерений при использовании регрессионных моделей не приводит к улучшению результатов.

Результаты работы [10] подтверждают результаты предыдущих работ: применение данных TDX (мультиспектральных) и GEDI (лидар) на трех участках в Калифорнии (США), Нью-Гемпшире (США) и Коста-Рике позволило получить значения R^2 от 0,82 до 0,90, в то время как только для данных GEDI – от 0,58 до 0,90, что еще раз показывает важность совместного применения лидарных и мультиспектральных снимков для оценки биомассы.

В работе [21] полученные результаты (R^2-коэффициент) следующие: для уравнений объема ствола с использованием только общей модели покрова, общей модели покрова с DSM (дискретный возврат) и общей модели покрова с DSM (полная волна) значения составили 0,93, 0,94 и 0,95 соответственно. А для уравнений объема биомассы – 0,87, 0,88 и 0,91 соответственно. Показано, что наиболее надежными характеристиками для оценки биомассы оказались интегральные характеристики сигналов лидара.

В работе [12] рассказывается об используемом методе классификации объектов карты по классам покрытия. При определении списка классов голая земля и застроенные территории относятся к одному и тому же классу. Применение сегментации с переменным значением масштаба (ПО eCognition (Trimble)) и алгоритма классификации kNN позволило получить значения R^2-коэффициентов для моделей оценки биомассы в горных районах и низинах, равные 0,93 и 0,89 соответственно.

В работе [13] точность полученных моделей оценки биомассы, по утверждению авторов, не является высокой (значения R^2-коэффициентов при этом не приведены). Они же утверждают, что в сравнении с данными бортовых лидаров данные спутниковых лидаров (работы других авторов, на которые ссылаются авторы [13]) показывают более худшие результаты, точнее углеродные карты на их основе (в данной работе использовался лидар Leica на борту самолета).

А для оценки биомассы травянистой растительности на болотах в работе [14] используется модель «случайный лес», которая обучается с применением подхода перекрестной проверки K-Fold. Для распространения стандартных ошибок средней плотности углерода применяется многомерный дельта-метод, а для вычисления стандартных ошибок по группам пикселей и типам болотистых угодий (классификация) – матрица смежности. Результаты на нескольких участках болот в Америке показали, что плотность травянистой растительности в 95 % случаев не превышает 1,56 кг/м^2 (разумеется, для северного региона данная цифра может отличаться). Значения общей точности классификации растительности составили от 80,5 % до 98 %. Однако для задачи регрессии полученные значения R^2 невысокие: от 0,36 до 0,61. Причем рассматривались различные комбинации индексов растительности (SAVI, NDVI, WDRVI5) и наборов данных (спутники Sentinel, Landsat).

В работе [15] для оценки биомассы растительности на городских территориях использовались BRT-модели. Значения R^2-коэффициентов для 300 BRT-моделей составили 0,77-0,89 для данных ландшафта и 0,42-0,65 для моделей формы города.

Исходя из представленных результатов аналогичных работ, видно, что совместное применение мультиспектральных данных и данных лидара при создании карт плотности углерода приводит к наиболее точным оценкам биомассы, а углеродные карты на основе данных бортовых лидаров имеют более высокую точность, чем углеродные карты на основе спутниковых лидаров. Различий в результатах при использовании различных способов обработки сигналов лидара (построение профиля высоты или воксельный подход) и моделей регрессии (случайный лес, BRT, методы классификации и сегментации) не замечено, поэтому в нашем случае будет необходима проверка этих двух способов на более высокую точность оценки биомассы.

При оценке биомассы лесов практически во всех работах применяются регрессионные модели для оценки согласованности сигналов лидара с полевыми измерениями.

Адаптация подхода к северному региону. Как говорилось ранее, разрешение снимка в 500 метров оказывается слишком грубым для анализа региона. Протяженность ХМАО с запада на восток составляет около 1400 км (2 800 пикселей), а с севера на юг – около 820 км (1

640 пикселей). Поэтому были рассмотрены (с учетом ограничений по длине волны) альтернативные варианты спутниковых снимков, которые могут подойти в нашем случае:

Таблица 1 – Альтернативные варианты спутниковых снимков

Спутник	Канал (длина волны, нм)	Разрешение, м
Landsat-7	band 5 (1550-1750)	30
	band 7 (2080-2350)	30
Landsat-8	band 6 (1560-1660)	30
	band 7 (2100-2300)	60
WorldWiew3 (коммерческий)	SWIR-3 (1640-1680)	3,7
	SWIR-5 (2145-2185)	3,7
	CAVIS Snow (1620-1680)	30
	Aerosol-3 (2105-2145)	30
Sentinel 2	B4 (665)	10
	B11 (1610)	20
	B12 (2190)	20

Данные каналы удовлетворяют предложенному в работе [10] оптимальному значению разрешения спутниковых изображений в 100 м.

Также следует иметь в виду отличие видов растительности северного региона от видов растительности экваториальных районов Земли, для которых, собственно, и проводились описанные в работах [2, 3] исследования.

Что касается бортовых лидаров, то возможности их применения в нашей работе, скорее всего, не будет, хотя углеродные карты на основе данных бортовых лидаров и показывают бóльшую точность по сравнению со спутниковыми лидарами.

Предлагаемая программа исследований

Исходя из анализа представленной литературы, предлагается выполнение следующих исследований по созданию углеродной карты ХМАО:

1. Исследование лидарных данных GLAS и мультиспектральных данных представленных в таблице 1 спутников. Цель – определение наиболее подходящих и одновременно доступных спутниковых изображений.

2. Определение классов земного покрова и участков, соответствующих пятнам лидара. Проведение полевых измерений. Цель – определение средних значений биомассы на участках для разных классов земного покрова.

3. Исследование различных способов обработки сигналов лидара и регрессионных моделей перевода характеристик сигнала в значения биомассы. Цель – получение способа обработки сигналов лидара, дающего наибольшую точность вычисления биомассы.

4. Исследование моделей классификации земного покрова по мультиспектральным спутниковым изображениям. Цель – получение модели классификации земного покрова с наибольшей точностью и создание на ее основе углеродной карты ХМАО.

Заключение

В данной работе проанализирован один из подходов к построению карт плотности углерода, которые предназначены для оценки объема растительности и содержащегося в ней углерода. Подход основан на применении биометрических данных (измерение высоты деревьев и диаметра ствола), спутниковых снимков (оптических, инфракрасных и лидарных), расчете и анализе групп пикселей с помощью множественной линейной регрессии. Данный подход применен для построения карты плотности углерода для экваториальных районов Африки, Азии, Южной Америки.

В работах [2-3] приведено подробное описание используемых математических методов перевода биометрических данных в значения плотности углерода, указаны требования к ис-

пользуемым данным, а также приведены результаты тестирования алгоритма и другие рекомендации по использованию данных.

Помимо указанных работ проведен детальный анализ аналогичных существующих подходов к оценке биомассы с помощью дистанционного зондирования Земли. На основе анализа определены основные методы и подходы, используемые как для оценки биомассы лесов, так и для оценки биомассы травяной растительности болот (которых достаточно много на территории ХМАО) и оценки биомассы растительности в городских территориях. Полученный обзор методов и подходов позволил составить программу исследований именно для нашего случая.

Также спланированы шаги по адаптации подхода из работы [3] к одному из регионов Крайнего Севера России – ХМАО. Так, выяснилось, что для составления карты углерода в масштабе региона необходимо использовать изображения большего разрешения. Поэтому был произведен поиск действующих на январь 2022 года спутников, а также подходящих нам каналов съемки. Что касается лидарных данных, то для ХМАО имеется более 5000 файлов со спутника ICESat-2 за более чем 3 года. Общий объем – около 11 Тб.

Также необходимо учитывать различие в видах растительности для экваториальных лесов и тайги (тундры), в зоне которой расположен ХМАО. Для них придется обучать новые регрессионные модели, которые, вероятнее всего, будут отличаться набором переменных и коэффициентами при них.

Список литературы

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году». – Текст : электронный // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. – 2021. – URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2020/?PAGEN_2=2 (дата обращения: 14.01.2022).

2. Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss / A. Baccini, W. Walker, L. Carvallo [et al] // Science. – 2017. – Vol. 358, № 6360. – P. 230–234.

3. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps / A. Baccini, S. J. Goetz, W. S. Walker [et al.] // Nature climate change. – 2012. – Vol. 2, № 3. – P. 182–185.

4. ICESat. Cryospheric Sciences Lab // NASA. – 2021. – URL: https://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/glas.php (date of application: 20.01.2022).

5. ATLAS/ICESat-2 L2A Global Geolocated Photon Data, Version 5 // National Show and Ice Data Center. – 2021. – URL: https://nsidc.org/data/ATL03/versions/5 (date of application: 20.01.2022).

6. . Estimating the biomass of maize with hyperspectral and LiDAR data / C. Wang, S. Nie, X. Xiaohuang [et al] // Remote Sensing. – 2017. – Vol. 9, №. 1. – P. 11.

7. Above-ground biomass estimation using airborne discrete-return and full-waveform LiDAR data in a coniferous forest / S. Nie, C. Wang, H. Zeng [et al.] // Ecological Indicators. – 2017. – Vol. 78. – P. 221–228.

8. Fusion of airborne LiDAR data and hyperspectral imagery for aboveground and belowground forest biomass estimation / S. Luo, C. Wang, X. Xiaohuang [et al.] // Ecological Indicators. – 2017. – Vol. 73. – P. 378–387.

9. Non-destructive aboveground biomass estimation of coniferous trees using terrestrial LiDAR / A. Stovall, A. Voster, R. Anderson [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2017. – Vol. 200. – P. 31–42.

10. Forest biomass estimation over three distinct forest types using TanDEM-X InSAR data and simulated GEDI lidar data / W. Qi, S. Saarela, J. Armston [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2019. – Vol. 232. – P. 111283.

11. Global Ecosystem Dynamics Investigation // Wikipedia. – 2022. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Ecosystem_Dynamics_Investigation (date of application: 11.02.2022).

12. Impact of land cover change on aboveground carbon stocks in Afromontane landscape in Kenya / P. K. E. Pellikka, V. Heikinheimo, J. Hietanen [et al.] // Applied Geography. – 2018. – Vol. 94. – P. 178–189.

13. Estimating aboveground carbon density and its uncertainty in Borneo's structurally complex tropical forests using airborne laser scanning / T. Jucker, G. A. Asner, M. Dalponte [et al.] // Biogeosciences. – 2018. – Vol. 15, № 12. – P. 3811–3830.

14. A remote sensing-based model of tidal marsh aboveground carbon stocks for the conterminous United States / K. B. Byrd, L. Ballanti, N. Thomas [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2018. – Vol. 139. – P. 255–271.

15. Identification of fine scale and landscape scale drivers of urban aboveground carbon stocks using high-resolution modeling and mapping / M. G. E. Mitchell, K. Johansen, M. Maron [et al.] // Science of the total Environment. – 2018. – Vol. 622. – P. 57–70.

16. Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest / J. B. Drake, R. Dubayah, R. G. Knox [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2002. – Vol. 81, № 2-3. – P. 378–392.

17. Laser altimeter canopy height profiles: Methods and validation for closed-canopy, broadleaf forests / D. J. Harding, M. A. Lefsky, G. Parker, J. B. Blair // Remote Sensing of Environment. – 2001. – Vol. 76, № 3. – P. 283–297.

18. Cohen, W. B. Estimating structural attributes of Douglas-Fir / W. B. Cohen, T. A. Spies // Remote sensing of environment. – 1992. – Vol. 41, № 1. – P. 1–17.

19. Gemmell, F. M. Effects of forest cover, terrain, and scale on timber volume estimation with Thematic Mapper data in a Rocky Mountain site / F. M. Gemmell // Remote Sensing of Environment. – 1995. – Vol. 51, № 2. – P. 291–305.

20. Puhr, C. B. Remote sensing of upland conifer plantations using Landsat TM data: a case study from Galloway, south-west Scotland / C. B. Puhr, D. N. M. Donoghue // International Journal of Remote Sensing. – 2000. – Vol. 21, № 4. – P. 633–646.

21. Stem volume and above-ground biomass estimation of individual pine trees from LiDAR data: Contribution of full-waveform signals / T. Allouis, S. Durrieu, C. Vega [et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2012. – Vol. 6, № 2. – P. 924–934.

22. Inversion of a lidar waveform model for forest biophysical parameter estimation / B. Koetz, F. Morsdorf, G. Sun [et al.] // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2006. – Vol. 3, № 1. – P. 49–53.

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 г. Выпуск 1 (64). С. 134–144

УДК 004.046:550.834;517.972
DOI: 10.18822/byusu202201134-144

ПОИСК ПО ПОДОБИЮ ЗОН ТРЕЩИНОВАТОСТЕЙ В БАЗАХ ДАННЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА РЕШЕНИЯ ВАРИАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ICP В ЗАМКНУТОЙ ФОРМЕ И ИНВЕРТИРОВАННОГО ИНДЕКСА

Вохминцев Александр Владиславович
доктор технических наук,
заведующий научно-исследовательской лабораторией
«Интеллектуальные информационные технологии и системы»,
ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет»,
Челябинск, Россия
E-mail: vav@csu.ru

Ботов Дмитрий Сергеевич
кандидат технических наук
доцент Института информационных технологий
ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет»,
Челябинск, Россия
E-mail: dmbotov@gmail.com

Петриченко Юлия Владимировна
кандидат экономических наук,
директор института информационных технологий,
ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет»,
Челябинск, Россия
E-mail: iit@csu.ru

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Ямало-Ненецкого автономного округа в рамках научного проекта № 19-47-890001.

В работе предложены методы для быстрого поиска зон трещиноватостей в базах данных сейсморазведки на двух типах данных: сейсмический разрез (двумерные данные) и сейсмический куб (трехмерные данные). Данные методы являются составной частью технологии картографирования фильтрующих каналов и больших объемов сейсмических данных и полезны для автоматизации процесса интерпретации разнородных сейсмических данных. Предложенные в работе методы поиска по подобию зон трещиноватостей были исследованы с использованием эталонного набора данных Open Seismic Repository, который содержит информацию о геологических породах в районе акватории Северного моря, и сравнены с другими известными методами решения задачи, полученные результаты были обсуждены в статье.

Ключевые слова: зоны трещиноватости, картирование трещинных систем, сейсморазведка, сопоставление изображений, регистрация облаков точек.

VISUAL DUPLICATES SEARCH OF FRACTURE ZONES OF SEISMIC DATABASES BASED ON THE METHOD OF SOLVING THE ICP VARIATIONAL PROBLEM IN CLOSED FORM AND INVERTED INDEX

Alexander V. Vokhmintsev
Doctor of Technical Sciences,
Head of ResearchLaboratory
"Intelligent Information Technologies and Systems",
Chelyabinsk State University
Chelyabinsk, Russia
E-mail: vav@csu.ru

Dmitriy S. Botov
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Institute of Information Technologies,
Chelyabinsk State University
Chelyabinsk, Russia
E-mail: dmbotov@gmail.com

Yuliya V. Petrichenko
Candidate of Economic Sciences,
Director of the Institute of Information Technologies,
Chelyabinsk State University
Chelyabinsk, Russia
E-mail: iit@csu.ru

The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research and Yamalo-Nenets Autonomous Okrug within the framework of the scientific project No. 19-47-890001.

In this paper fast methods are proposed for search the fracture zones in seismic databases on two types of data: seismic section (two-dimensional data) and seismic cube (three-dimensional data). These methods are an integral part of the mapping technology for filtering channels and large volumes of seismic data and useful for automating interpretation of heterogeneous seismic data. The proposed methods for searching the similarity of fracture zones were investigated using the Open Seismic Repository reference dataset, which contains information about geological rocks in the area of the North Sea and compared with other known methods for solving this problem, the results were discussed in the article.

Keywords: fracture zones, fractured systems mapping, seismic exploration, image matching, registration problem.

Введение

Для оперативного вовлечения в разработку нефтяных запасов ЯНАО в условиях высокой трудоемкости картографирования фильтрующих каналов и больших объемов сейсмических данных необходимо разработать информационные технологии картографирования фильтрующих каналов на основе методов машинного обучения и искусственного интеллекта [1]. До появления методов машинного обучения данные сейсморазведки обрабатывались специалистами-интерпретаторами, которые производили ручное выделение геологических слоев, разломов и горизонтов на сейсмических разрезах и кубах. Главные проблемы при обработке данных сейсморазведки связаны с неоднозначностью интерпретации данных и ростом их

объема [2]. В данной работе рассматриваются методы для автоматизации выделения зон трещиноватостей на 2D-изображениях (сейсмический разрез) и 3D-моделях (сейсмический куб). Во втором случае сейсмотрассы в кубе соответствуют определенному классу в кубе и представляют из себя трехмерные объекты (облака точек), поэтому задача интерпретации при разметке данных сводится к задаче сравнения трехмерных облаков точек.

Для поиска сходства сейсмических разрезов на изображениях [3] в качестве признаков принято использовать методы, основанные на следующих свойствах изображения: цветовые свойства изображения [4], характерные точки изображения [5], свойства текстур изображения [6], различные сочетания этих свойств [7]. В данной работе предлагается метод поиска по визуальному подобию зон трещиноватостей для динамически пополняемых баз данных с сейсмическими изображениями на основе использования метода индексации гистограмм изображений [8], который представлен во втором разделе статьи.

Для поиска сходства сейсмических разломов в сейсмических кубах используются различные методы, например применяются методы машинного обучения на основе нейронных сетей. В работах [9, 10] представлены методы, которые позволяют осуществлять классификацию трехмерных объектов по точкам, а в работах [11, 12] представлены методы для сравнения трехмерных поверхностей на основе графов. Для решения проблемы высокой вычислительной сложности при анализе сейсморазведочных данных используются модели нейросетей на разреженных структурах данных [13, 14, 15] и вариационных автокодировщиках [16]. Для поиска сходства сейсмических разломов в сейсмических кубах наиболее лучшими методами, которые обладают высокой точностью при хороших показателях производительности, являются методы, основанные на анализе геометрической и топологической структуры трехмерных объектов, которые условно можно поделить на две группы [11]. Первая группа основана на анализе трехмерных поверхностей на основе сопоставления их признаковых описаний: в этом случае задача сводится к задаче сопоставления двух графов, вершины которых размечены различными данными об отдельных частях трехмерной поверхности, а рёбра размечены данными о степени связности этих частей [11, 12]. Вторая группа методов при сравнении двух трехмерных поверхностей основана на решении задачи регистрации данных. Одним из известных алгоритмов для регистрации трехмерных поверхностей является итеративный алгоритм ближайших точек (Iterative closest point, ICP) [17]. Алгоритм использует итеративную процедуру минимизации среднего расстояния между двумя трехмерными облаками точек. Данный метод представлен в третьем разделе статьи. Полученные результаты были сравнены с известными методами и обсуждены в разделе «Компьютерное моделирование», а выводы по работе отражены в разделе «Заключение».

Поиск по визуальному подобию зон трещиноватостей в базах данных сейсморазведочной информации с использованием инвертированного индекса цветовых гистограмм

Пусть $I = \{a_i\}_{i=1}^{M}$ набор изображений в базе данных сейсморазведки, содержащий зоны трещиноватости, внутри которого необходимо определить соответствие между различными сейсмическими снимками с использованием меры визуального сходства различных снимков. Каждый снимок $a \in I$ в базе данных сейсморазведки содержит вектор $\Phi(a) = \langle \varphi_1^a, \dots, \varphi_N^a \rangle$, состоящий из набора признаков, характеризующих разломы и горизонты на сейсмических разрезах, при этом N является мощностью пространства различных сейсмических признаков $\mathbb{R}^N$. Давайте будем называть два сейсмических снимка $a \in I$и $b \in I$ визуально похожими в том случае, если существует некоторая функция $\rho(a, b)$, являющаяся мерой оценки визуального сходства двух различных изображений. Дополнительно потребуем выполнения следующего условия $\rho(a, b) = 1 - f(\Phi(a), \Phi(b)) \geq f_{min}$, где $f(.,.)$ – метрика в $\mathbb{R}^N$, а f_{min} – некоторый порог, который определяет степень сходства двух различных сейсмических снимков.

Известно, что для оценки сходства интересны только те компоненты вектора $\Phi(a)$, с использованием которых можно идентифицировать нечёткие копии эталонных сейсмических снимков [18]. При этом исходный сейсмический снимок представляет собой набор точек $P(a) = \{(x, y)\}$ в двумерном пространстве, в котором для любой точки определено некоторое значение функции цвета $C\ (x, y)$ в некоторой выбранной пользователем цветовой модели Ω: C(x, y): P(a) ⟶ Ω. В данной работе используется цветовая модель RGB. Для определения изменений между различными сейсмическими снимками в базе данных исходное изображение приводится к меньшей размерности $\sigma = |\Omega|$. Учитывая введенные ограничения, можно дать определение гистограммы H_σ сейсмического снимка $a \in I$ как отображения следующего вида: [8]

$$H_\sigma(a): P(a) \longrightarrow \mathbb{R}^\sigma, \tag{1}$$

где $H_\sigma(a) = \langle v_1^a, \dots, v_\sigma^a \rangle, v_i^a = \frac{|\{(x,y) \in P(a) | C(x,y) = c_i\}|}{|P(a)|}$, c_i – значение компоненты цвета в пространстве размерности σ.

Гистограммы различных по содержанию сейсмических снимков могут быть очень похожими. Поэтому в работе для определения распределения цвета в разных областях сейсмического снимка используется подход, при котором анализируются гистограммы, которые соответствуют отдельным сегментам сейсмического снимка, а не гистограмме снимка в целом.

Каждый сейсмический снимок a разделяется на изолированные области $S(a) = \{s_j(a)\}_{j=1}^K$, при этом возможен вариант, при котором некоторые области будут перекрывать друг друга.

Сегмент сейсмического снимка $s_j(a)$ представляет из себя область изображения, ограниченную квадратом, при этом $K = r \times r$, где r представляет из себя гиперпараметр алгоритма сегментирования изображения. Нумерация сегментов снимка производится слева направо и сверху вниз. Затем для каждого сегмента сейсмического снимка $s_j(a)$ создается гистограмма изображения $H_\sigma(s_j(a))$. Установление схожести двух сейсмических снимков в базе данных сейсморазведки выполняется отдельно для каждого сегмента

$$\varphi_i^a = v_{i-J\sigma}^{S_{J+1}(a)}, \tag{2}$$

где $i = \overline{1, (r \cdot \sigma)}, J = \left[\frac{i}{r}\right], [.]$ есть обозначает математическую операцию получения целого значения. Для установления сходства двух сейсмических снимков могут использоваться различные метрики, например, косинусное и евклидово расстояния, метрики Минковского и Бхаттачария и др. Вычислительная сложность предложенного способа прямого сравнения сейсмических снимков является квадратичной $O(\frac{I^2}{2})$, так как происходит сравнение каждого снимка с каждым. Вычислительная сложность для операции определения сходства двух сейсмических снимков равна $O(r \cdot \sigma)$.

Основным недостатком такого способа установления соответствия является его высокая вычислительная сложность. Для повышения вычислительной сложности алгоритма установления сходства сейсмических снимков в работе предлагается использовать инвертированные индексы (ИИ), для которых осуществляется предварительная обработка снимков в соответствии с задаваемым пользователем набором критериев [19]. Для того чтобы создать ИИ сейсмического снимка a на основе гистограмм его сегментов, необходимо сопоставить компонентам вектора признаков $\Phi(a)$ сейсмического снимка соответствующие гистограммные слова.

Гистограммные слова дают содержательную характеристику о геологических слоях, горизонтах и разломах, информация о которых закодирована в исходных вещественных значениях φ_i^a вектора признаков. Дадим определение «конечного покрытия отрезка» [0;1]:

$$\Delta = \{[x_i; y_i]\} | 0 \le x_i < y_i \le 1, \cup_{i=1}^{|\Delta|} [x_i; y_i] = [0; 1]\ . \tag{3}$$

Разделим отрезок [0;1] на набор подотрезков G с гиперпараметрами: α – длина подотрезка и $\beta < \frac{\alpha}{2}$ – перекрытие подотрезка.

Установим в соответствие для любой компоненты φ_j^a, принадлежащей вектору сейсмических характеристик $\Phi(a)$, набор соответствующих кортежей вида $\xi_j^a = \{\langle j, i\rangle | \varphi_j^a \epsilon [x_i; y_i], i = \overline{1, |\Delta|}\}$ таких, что

$$E: \mathbb{R} \to \Lambda, \tag{4}$$

где $\Lambda = \{j \in \mathbb{N} | j \le N\} \times \{i \in \mathbb{N} | i \le |\Delta|\}$, т.е. $\xi_j^a \subseteq \Lambda$.

Тогда можно дать определение для гистограммного слова.

Определение 1. Гистограммное слова сейсмического снимка

Пусть существуют кортежи $\langle j, i\rangle$, где i – параметры, которые указывают значение индекса отрезков $[x_i; y_i] \in \Delta$ такие, что значение любого сейсмического признака φ_j^a принадлежит указанным отрезкам. Тогда назовем кортеж вида $\langle j, i\rangle$ гистограммным словом.

Давайте зададим отображение $\sum: \mathbb{R}^N \to \Lambda$, которое устанавливает соответствие между вектором признаков $\Phi(a)$ сейсмического снимка и множеством гистограммных слов. Дополнительно отметим, что для множеств ξ_j^a справедливо утверждение $\xi_j^a \cap \xi_{j'}^a = \emptyset, j = j'$, тогда можно положить, что $\sum \Phi(a) = \bigcup_{j=1}^{N} \xi_j^a$.

Определение 2. Отношение O1 на множестве Λ: кортеж $\langle j, i\rangle$ предшествует кортежу $\langle j', i'\rangle$ при выполнении условий:

- справедливо неравенство $j < j'$;
- справедливо равенство $j = j'$, где $i < i'$.

Для того чтобы создать ИИ изображения a из гистограммных слов, необходимо выполнить построение обычного (прямого) индекса сейсмического снимка по вектору его признаков $\Phi(a)$ по формуле $\mathrm{DI(a)} = \{\langle j, i, \varphi_j^a\rangle | \langle j, i\rangle \in \sum \Phi(a)\}$. Далее осуществляется сортировка значений элементов в индексе сейсмического снимка по правилам, заданным в определении отношения O1.

Определение 3. ИИ сейсмических снимков есть структура данных, в которой для любого кортежа $\langle j, i\rangle$ в соответствующем списке определены все сейсмические снимки в базе данных, в которых оно встретилось: $II(\langle j, i\rangle) = \{\langle id^a, \varphi_j^a\rangle | a \in I\}$, где id^a – идентификатор сейсмического снимка a. ИИ сейсмических снимков создается на основе процедуры слияния индексов $\mathrm{DI(a)}$.

Для того чтобы осуществить поиск по подобию зон трещиноватостей в базах данных сейсморазведочной информации на основе инвертированного индекса, необходимо выполнить следующую процедуру (процедура 1):

Шаг 1. Инициализация вектора сейсмических признаков $\Phi(\mathrm{c})$ для эталонного сейсмического снимка c.

Шаг 2. Создание прямого индекса сейсмического снимка $\mathrm{DI(c)}$.

Шаг 3. Преобразование множеств $II(\langle j, i\rangle)$ и $\langle j, i\rangle \in \sum \Phi(\mathrm{c})$ в множество троек вида: $S(\langle j, i\rangle) = \{\langle id^a, j, \varphi_j^a\rangle | a \in I\}$, $\langle j, i\rangle \in \sum \Phi(\mathrm{c})$ с использованием добавления в кортеж $\langle id^a, \varphi_j^a\rangle$ значения индекса j-го сейсмического признака в векторы сейсмических признаков $\Phi(a)$ для каждого гистограммного слова.

Элементы множеств снимков $S(\langle j, i\rangle), \langle j, i\rangle \in \sum \Phi(\mathrm{c})$ перед выполнением описанной ранее процедуры 1 отсортированы по возрастанию значения параметра id^a, при этом значение j имеет фиксированное значение для всех элементов во всех множествах $S(\langle j, i\rangle)$.

Определение 4. Отношение O2 для применения операции объединения множеств $\mathbf{S}(\langle \mathbf{j}, \mathbf{i}\rangle)$: тройка $\langle \mathrm{id^a}, \mathrm{j}, \varphi_{\mathrm{j}}^{\mathrm{a}}\rangle$ предшествует тройке $\langle \mathrm{id^b}, \mathrm{j}', \varphi_{\mathrm{j}'}^{\mathrm{b}}\rangle$ если

- справедливо неравенство $id^a < id^b$;
- справедливо равенство $id^a = id^b$, но при этом $j < j'$.

При этом важно, чтобы указанные равенство и неравенство выполнялись одновременно.

Отношение O2 позволяет выполнить операцию объединения (слияния) двух множеств снимков $S(\langle j,i\rangle)$ в ИИ, при этом результатом данной операции является кортеж $\tilde{S}(c)$, содержащий сведения о сейсмических снимках, рекомендованных к включению в ИИ. Назовем такие сейсмические снимки кандидатами.

Оценка сходства эталонного сейсмического снимка и снимка кандидата вычисляется с использованием 1-го прохода по множеству снимков $\tilde{S}(c)$. Данная оценка не удовлетворяет требованию симметричности и представляет собой псевдометрику. В работе для оценки сходства двух сейсмических снимков предлагается использовать расстояние Хэмминга, с помощью которого оценка сходства эталонного сейсмического изображения *c* и найденного в структуре ИИ сейсмического снимка *a* принимает вид

$$\rho_M(c,a) = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{N} g(\varphi_j^a,\varphi_j^c)}{2}, \tag{5}$$

где $g(\varphi_j^a,\varphi_j^c) = \begin{cases} |\varphi_j^a - \varphi_j^c|, \text{если } \langle id^a, j, \varphi_j^a\rangle \in \tilde{S}(c) \\ \max\limits_{[x_i;y_i]\in\Delta}\{y_i|\varphi_j^a \in [x_i;y_i]\} - \min\limits_{[x_i;y_i]\in\Delta}\{x_i|\varphi_j^a \in [x_i;y_i]\}, \text{иначе} \end{cases}$.

В формуле (5) отсутствует свойство симметрии из-за вида функции $g(\varphi_j^a,\varphi_j^c)$. Свойства функции $g(\varphi_j^a,\varphi_j^c)$ приводят к нарушению симметрии в формуле (5) для получения оценки сходства сейсмических снимков, так как при поиске по подобию с использованием ИИ в базе данных сейсморазведочных снимков используются данные только по тем гистограммным словам и только для тех значений *j*, когда различные сейсмические признаки φ_j^a и φ_j^c включены в один отрезок. В противном случае полагаем, что модуль разности $|\varphi_j^a - \varphi_j^c|$ не превышает длины определенного интервала, покрывающего оба этих подотрезка. Заметим, что подотрезки получены в результате процедуры квантованиия, и в эти подотрезки попадает значение сейсмических признаков φ_j^c (см. рис. 1).

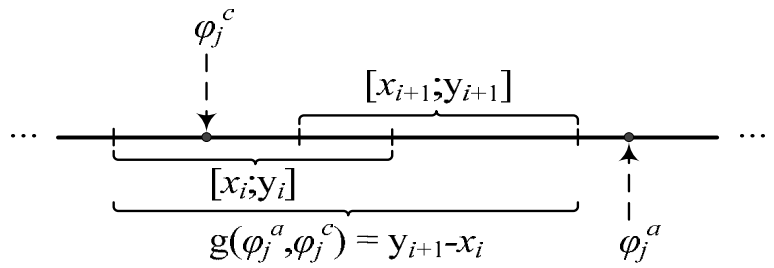


Рисунок 1. Оценка разности $|\varphi_j^a - \varphi_j^c|$ при выполнении процедуры квантования

Поиск по подобию зон трещиноватостей в базах данных сейсморазведочной информации на основе комбинированного метода решения вариационной задачи ICP

Определение 5. Решение вариационной задачи для поиска по подобию зон трещиноватостей с помощью итеративного алгоритма ближайших точек (ICP)

Пусть $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ – трехмерное представление эталонного сейсмического куба в виде облака точек и $Y = \{y, \dots, y_m\}$ – трехмерное представление сейсмического куба в виде облака точек в базе данных сейсморазведочной информации в $\mathbb{R}^3$. Тогда решение поставленной вариационной задачи запишем в виде

$$Rx_i + T, \tag{6}$$

где R – матрица поворота, T – вектор переноса, $i = 1, \dots, n$.

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}, T = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix}, x_i = \begin{pmatrix} x_{1i} \\ x_{2i} \\ x_{3i} \end{pmatrix}, y_i = \begin{pmatrix} y_{1i} \\ y_{2i} \\ y_{3i} \end{pmatrix}. \tag{7}$$

Решение вариационной задачи для поиска по подобию зон трещиновато-стей можно представить в виде функции

$$J(R,T) = \sum_{i=1}^{n} \| \ R\, x_i + T - \ y_i \ \|^2. \tag{8}$$

Пусть $\sum_{i=1}^{n} x_{1i}^2 \neq 0, \sum_{i=1}^{n} x_{2i}^2 \neq 0, \sum_{i=1}^{n} x_{3i}^2 \neq 0$, тогда решим вариационную задачу поиска подобия между сейсмическими кубами, используя тензор R:

$$\frac{\partial J(R)}{\partial r_{1k}} = \sum_{i=1}^{n} 2\,(\,r_{11}x_{1i} + \ r_{12}x_{2i} + \ r_{13}x_{3i} \ - y_{1i})x_{ki} = 0, k = 1,2,3. \tag{9}$$

Далее получим

$$\sum_{i=1}^{n}(\,r_{1\mathrm{m}}x_{\mathrm{m}i} + \ r_{1\mathrm{n}}x_{\mathrm{n}i} - y_{1i})x_{ki} + r_{1k}\sum_{i=1}^{n} x_{ki}^2 = 0, \tag{10}$$
$$k,m,n = 1,2,3, m,n \neq k.$$

Из формулы (10) получим значение компонента поворота тензора R:

$$r_{1k} = -\frac{\sum_{i=1}^{n}(\,r_{1\mathrm{m}}x_{\mathrm{m}i} + r_{1\mathrm{n}}x_{\mathrm{n}i} - y_{1i})x_{ki}}{\sum_{i=1}^{n} x_{ki}^2}. \tag{11}$$

На основе формулы (11) перепишем решение вариационной задачи в следующем виде, используя ряд преобразований в функционале J(R) [20]:

$$J(R) == \sum_{i=1}^{n}\left(\begin{array}{c} r_{1\mathrm{m}}\left(x_{\mathrm{m}i} - x_{ki}\frac{\sum_{j=1}^{n} x_{mj}x_{kj}}{\sum_{j=1}^{n} x_{kj}^2}\right) + \\ +r_{1\mathrm{n}}\left(x_{ni} - x_{ki}\frac{\sum_{j=1}^{n} x_{nj}x_{kj}}{\sum_{j=1}^{n} x_{kj}^2}\right) - \left(y_{1i} - x_{ki}\frac{\sum_{j=1}^{n} y_{1j}x_{kj}}{\sum_{j=1}^{n} x_{kj}^2}\right) \end{array}\right)^2 + \tag{12}$$
$$+(\,r_{21}x_{1i} + \ r_{22}x_{2i} + \ r_{23}x_{3i} - y_{2i})^2 +$$
$$+(\,r_{31}x_{1i} + \ r_{32}x_{2i} + \ r_{33}x_{3i} - y_{3i})^2.$$

Введем следующие определения:

$$G_{mi} = x_{\mathrm{m}i} - x_{ki}\frac{\sum_{j=1}^{n} x_{mj}x_{kj}}{\sum_{j=1}^{n} x_{kj}^2}, G_{pi} = x_{ni} - x_{ki}\frac{\sum_{j=1}^{n} x_{nj}x_{kj}}{\sum_{j=1}^{n} x_{kj}^2}. \ G_{ki} = y_{1i} - x_{ki}\frac{\sum_{j=1}^{n} y_{1j}x_{kj}}{\sum_{j=1}^{n} x_{kj}^2}. \tag{13}$$

На основе определений (13) запишем решение вариационной задачи:

$$J(R) = \sum_{i=1}^{n}(\,r_{1\mathrm{m}}G_{mi} + r_{1\mathrm{n}}G_{pi} - G_{ki})^2 + \ (\,r_{21}x_{1i} + \ r_{22}x_{2i} + \ r_{23}x_{3i} - -y_{2i})^2 + (\,r_{31}x_{1i} + r_{32}x_{2i} + \ r_{33}x_{3i} - y_{3i})^2. \tag{14}$$

Получим формулу для вычисления $r_{1\mathrm{m}}$:

$$\frac{\partial J(R)}{\partial r_{1m}} = 2\sum_{i=1}^{n}\left(r_{1\mathrm{m}}G_{mi} + r_{1\mathrm{n}}G_{pi} - G_{ki}\right)G_{mi} = 0, r_{1\mathrm{m}} = -\frac{r_{1\mathrm{n}}\sum_{i=1}^{n} G_{mi}G_{pi} - \sum_{i=1}^{n} G_{mi}G_{ki}}{\sum_{i=1}^{n} {G_{mi}}^2}. \tag{15}$$

Подставим полученное значение $r_{1\mathrm{m}}$ в решение вариационной задачи поиска подобия между сейсмическими кубами и перегруппируем слагаемые

$$J(R) = \sum_{i=1}^{n}(\,r_{1n}\left(G_{pi} - \frac{G_{mi}\sum_{j=1}^{n} G_{mj}G_{pj}}{\sum_{j=1}^{n} {G_{mj}}^2}\right) - \left(G_{ki} - \frac{G_{mi}\sum_{j=1}^{n} G_{mj}G_{kj}}{\sum_{j=1}^{n} {G_{mj}}^2}\right))^2 +$$
$$+\,(\,r_{21}x_{1i} + \ r_{22}x_{2i} + \ r_{23}x_{3i} - y_{2i})^2 + (\,r_{31}x_{1i} + \ r_{32}x_{2i} + \ r_{33}x_{3i} - y_{3i})^2. \tag{16}$$

Для удобства записи введем следующие определения:

$$q_1 = G_{pi} - \frac{G_{mi}\sum_{j=1}^{n} G_{mj}G_{pj}}{\sum_{j=1}^{n} {G_{mj}}^2}, q_2 = G_{ki} - \frac{G_{mi}\sum_{j=1}^{n} G_{mj}G_{kj}}{\sum_{j=1}^{n} {G_{mj}}^2}. \tag{17}$$

Получим формулу для вычисления r_{1n}

$$\frac{\partial J(R)}{\partial\, r_{1n}} = 2\sum_{j=1}^{n}(r_{1n}q_1 - q_2)\,q_1 = 0, r_{1n} = \frac{\sum_{k=1}^{n} q_1 q_2}{\sum_{k=1}^{n} q_1^2}. \tag{18}$$

Таким образом, при $\sum_{k=1}^{n} q_1^2 \neq 0$ определены все параметры первой строки тензора R. Аналогичным образом могут быть определены вторая и третья строка тензора R. Теперь получим формулу для определения значений тензора T через элементы тензора R:

$$t_k = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(y_{ki} - (r_{k1}x_{1i} + r_{k2}x_{2i} + r_{k3}x_{3i})\right) = 0, k = 1,2,3\,. \quad (19)$$

Представим алгоритм поиска по подобию зон трещиноватостей в базах данных сейсморазведочной информации в виде повторяющейся последовательности шагов:

1. Сокращение количества точек в сейсмических кубах X и Y.
2. Определение соответствующих точек в сейсмических кубах X и Y с использованием алгоритма на основе k-d деревьев.
3. Инициализация значений весовых коэффициентов для каждой пары соответствующих точек в сейсмических кубах X и Y.
4. Исключение выбросов для соответствующих точек в сейсмических кубах X и Y с использованием алгоритма RANSAC.
5. Выбор метрики «точка-точка» для классификации для соответствующих пар точек в сейсмических кубах.
6. Решение вариационной задачи поиска по подобию зон трещиноватостей с помощью итеративного алгоритма ближайших точек (ICP) на основе метрики «точка-точка».

Компьютерное моделирование

При анализе данных сейсморазведки принято использовать эталонные сейсмические данные для оценки качества проведения эксперимента. В области сейсморазведки очень часто используют эталонный набор данных Open Seismic Repository, содержащий информацию об особенностях геологических пород в районе акватории Северного моря [21], для верификации методов машинного обучения, например, в ряде работ, представленных во введении [10, 13], использован также этот набор данных. В данной работе также проведено компьютерное моделирование предложенного метода поиска по визуальному подобию зон трещиноватостей в базах данных сейсморазведочной информации с использованием инвертированного индекса цветовых гистограмм на примере эталонного набора данных Open Seismic Repository. В перечисленных работах получены результаты, которые являются уникальными, содержат особенности геологических пород исследуемого региона нефтедобычи и сильно зависят от особенностей анализируемого набора сейсморазведочных данных. Данное обстоятельство объясняется различным набором аппаратных и программных средств, которые используются как для проведения сейсморазведки, так и для преобразования данных с сейсмодатчиков в формат, который можно использовать в процессе интерпретации. Поэтому решение задачи разметки геологических данных в общем случае привязано к конкретному эксперименту. Таким образом, при использовании единого набора данных для верификации методов анализа сейсморазведочных данных становится возможным сравнение точности метода поиска в сейсморазведочных базах данных. При проведении компьютерного моделирования изменялся порог подобия для оценки $\rho_M(c, a)$ в формуле (5), в результате чего менялись результаты поиска в базе данных сейсморазведочных данных (см. таблицу 1). Анализируя данные таблицы, можно сделать вывод, что предложенный метод осуществляет поиск снимков-кандидатов в эталонном наборе данных Open Seismic Repository с высоким значением полноты как для варианта поиска с метрикой микроусреднения, так и для поиска с метрикой макроусреднения.

Таблица 1 – Макро- и микроусреднение значений полноты в зависимости от pyf-порога сходства

Значение порога подобия	$recall_{micro_av}$	$recall_{micro_av}$
0,26	0,998896	0,998766
0,32	0,996651	0,998273
0,3215	0,994442	0,994641
0,3248	0,985166	0,988001
0,33	0,983383	0,986124

0,3318	0,981147	0,985104
0,3334	0,98051	0,983747
0,335	0,97112	0,981951
0,3396	0,97055	0,978993
0,346	0,953253	0,970468
0,35	0,953366	0,965171
0,356	0,948892	0,959626
0,3675	0,838221	0,900111
0,3705	0,661542	0,686451
0,38	0,342062	0,634441

В работе проведено исследование свойств сходимости для предложенного метода поиска по подобию зон трещиноватостей на основе комбинированного подхода решения вариационной задачи ICP (см. рисунок 2). Исследование проведено в сравнении с другими известными методами решения задачи с метрикой «точка-точка» с экстраполяцией [74] и без экстраполяции [71]. Было установлено, что предложенный метод показывает лучшую сходимость, чем указанные выше методы регистрации данных на одних и тех же эталонных данных.

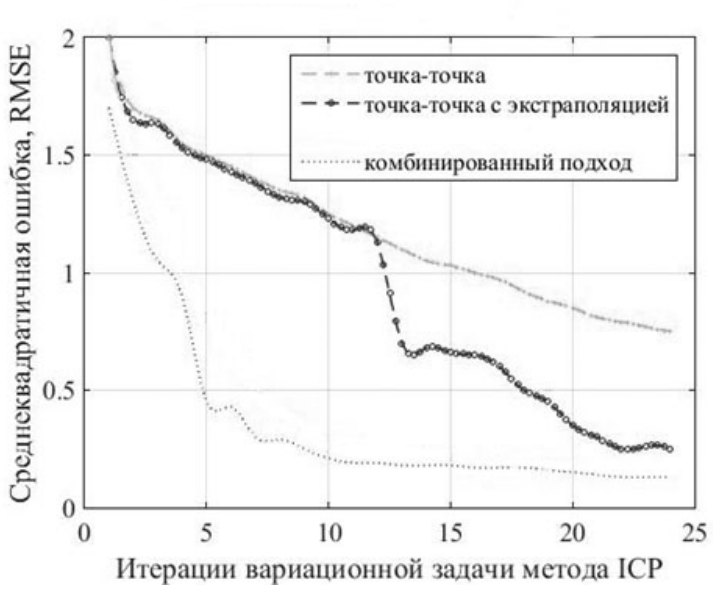


Рисунок 1. Исследование свойств сходимости для предложенного комбинированного подхода к поиску по подобию зон трещиноватостей

Заключение

В работе предложен метод поиска по визуальному подобию зон трещиноватостей в базах данных сейсморазведочной информации с использованием инвертированного индекса цветовых гистограмм, который обладает высоким значением полноты как для варианта поиска с метрикой микроусреднения, так и для поиска с метрикой макроусреднения. В работе также предложен метод поиска по подобию зон трещиноватостей в базах данных сейсморазведочной информации на основе комбинированного метода решения вариационной задачи ICP в замкнутой форме, который позволяет решать задачу интерпретации данных в сейсмическом кубе. Предложен подход к идентификации неотектонических структур по цифровым картам местности на основе методов трехмерной реконструкции, и проведено сравнение предложенного метода регистрации данных с методом Хорна для метрики «точка-точка». Результаты компьютерного моделирования показали, что предложенный метод лучше известных методов решения вариационной задачи регистрации по точности на используемой эталонной базе данных с сейсмическими снимками.

Список литературы

1. Глухманчук, Е. Д. Межслоевой сдвиг в породах баженовской свиты как региональный фактор внутриформационного разрывообразования / Е. Д. Глухманчук, В. В. Крупицкий, А. В. Леонтьевский. – Текст : непосредственный // Недропользование XXI век. – 2014. – № 5 (49). – С. 24−26.

2. Глухманчук, Е. Д. Характеристика зон трещиноватости по неоднородности структуры поля деформаций отражающих горизонтов / Е. Д. Глухманчук. – Текст : непосредственный // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 1. – С. 106−112.

3. Мельниченко, А. Методы поиска изображений по визуальному подобию и детекции нечетких дубликатов изображений / А. Мельниченко, А. Гончаров. – Текст : непосредственный // ЛММИИ на РОМИП-2009 : труды РОМИП (Петрозаводск, сентябрь 2009). – Санкт-Петербург : НУ ЦСИ, 2009. – С. 108–121.

4. Matching and retrieval based on the vocabulary and grammar of color patterns / R. Mojsilović, J. Kovačević, J. Hu [et al.] // IEEE Transactions on Image Processing. – 2000. – Vol. 9. – P. 38–54.

5. Lowe, D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints / D. G. Lowe // International journal of computer vision. – 2004. – Vol. 60 (2). – P. 91–110.

6. Tamura, H. Textural features corresponding to visual perception / H. Tamura, S. Mori, T. Yamawaki // IEEE Transactions on. Systems, Man and Cybernetics. – 1978. – Vol. 8 (6). – P. 460–473.

7. Murala, S. Color and texture features for image indexing and retrieval / S. Murala, A. B. Gonde, R. P., Maheshwari // Proceedings of the IEEE International Advance Computing Conference Advance Computing Conference, IACC (Patiala, India, March 2009). – 2009. – P. 1411–1416.

8. Face recognition based on matching algorithm with recursive calculation of local oriented gradient histogram / A. V. Vokhmintcev, I. V. Sochenkov, V. V. Kuznetsov, D. V. Tikhonkikh // Doklady Mathematics. –2016. – Vol. 466 (3). – P. 453–459.

9. Charles, R. PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation / R. Charles, Qi H. S., M. Kaichun // Arxiv. – 2016. – URL: https://arxiv.org/pdf/1612.00593.pdf (date of application: 15.01.2022).

10. Komarichev, A. A-CNN: Annularly Convolutional Neural Networks on Point Clouds / A. Komarichev, Z. Zhong, J. Hua // Arxiv. – 2019. – URL: https://arxiv.org/pdf/1904.08017.pdf (date of application: 15.01.2022).

11. Smith, E. J. GEOMetrics: Exploiting Geometric Structure for Graph-Encoded Objects / E. J. Smith, S. Fujimoto, A. // Arxiv. – 2019. – URL: https://arxiv.org/pdf/1901.11461.pdf (date of application: 15.01.2022).

12. PyTorch-BigGraph: A Large-scale Graph Embedding System / A. Lerer, L. Wu, J. Shen [et al.] // Proceedings of The Conference on Systems and Machine Learning. – 2019. – URL: https://arxiv.org/pdf/1903.12287.pdf (date of application: 15.01.2022).

13. Zhou, Y. End-to-end learning for point cloud based 3d object detection / Y. Zhou, O. Tuzel Voxelnet // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2018. – P. 4490–4499.

14. . Riegler, G. OctNet: Learning Deep 3D Representations at High Resolutions / G. Riegler, A. O.man Ulusoy, A. Geier // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2017. – P. 3577–3586.

15. Wang, P.-S. O-CNN: A Patch-based Deep Representation of 3D Shapes / P.-S. Wang, C.-Y. Sun, Y. Liu // ACM Transactions on Graphics. – 2018. – URL: https://arxiv.org/pdf/1809.07917.pdf (date of application: 15.01.2022).

16. Brock, A. Generative and Discriminative Voxel Modeling with Convolutional Neural Networks / A. Brock, T. Lim, J. M. Ritchie // Arxiv. – 2016. – URL: https://arxiv.org/pdf/1608.04236.pdf (date of application: 15.01.2022).

17. Besl, P. A method for registration of 3-D shapes / P. Besl, N. McKay // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1992. – Vol. 14 (2). – P. 239–245.

18. Stricker, M. A. Color indexing with weak spatial constraints / M. A. Stricker, A. Dimai // Proceedings of the SPIE Electronic Imaging: Science and Technology: Storage and Retrieval for Still Image and Video Databases IV (San Jose, USA, February 1996). – 1996. – Vol. 2670. – P. 29–40.

19. Content-based query of image databases, inspirations from text retrieval: inverted files, frequency-based weights and relevance feedback / D. M. Squire, W. Müller, H. Müller, J. Raki // In Pattern Recognition Letters. –1999. – P. 143–149.

20. Вохминцев, А. В. Комбинированные методы навигации и составления карты на основе решения вариационной задачи точка-плоскость ICP для аффинных преобразований в трехмерном пространстве / А. В. Вохминцев, А. В. Мельников, С. В. Пачганов. – Текст : непосредственный // Информатика и ее применения. – 2020. – Т. 14 (1). – С. 101–112.

21. Netherlands Dataset: A New Public Dataset for Machine Learning in Seismic Interpretation / R.-M. Silva, L. Baroni, D. S. Civitarese [et al.] // ResearchGate. – URL: https://www.researchgate.net/publication/332139063] (date of application: 02.04.2021).

ЭКОНОМИКА СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 г. Выпуск 1 (64). С. 147–154

УДК 338.24:378(571.122)
DOI: 10.18822/byusu202201147-154

РЕАЛИЗАЦИЯ ПОДХОДОВ «БЕРЕЖЛИВОГО РЕГИОНА» В РАЗВИТИИ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ

Грошева Татьяна Александровна
кандидат экономических наук,
директор института академического дизайна,
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»,
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: t_grosheva@ugrasu.ru

Дивеева Галина Вячеславовна
кандидат педагогических наук
заместитель директора АУ ХМАО-Югры
«Институт развития образования»,
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: dgv@iro86.ru

Введение. Технологии бережливого производства получают всё большее распространение не только в производственной сфере российских предприятий, но и в системе государственного и муниципального управления, доказывая свою эффективность и результативность. В статье предпринимается попытка обобщения представлений о реализации бережливого производства в системе регионального управления и обоснования комплексной системы «бережливого» управления на примере системы оценки качества образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры.

Цель: провести анализ реализации концепции «бережливого региона» в системе управления качеством образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры.

Методы: в статье использованы такие общенаучные методы исследования как: обобщение, анализ и синтез, конкретизация.

Результаты: определены основные направления реализации концепции «бережливого региона» в системе государственного управления качеством оказания услуг отраслей социальной сферы. Детально проанализирована региональная методика комплексной оценки качества образовательных результатов обучающихся школ Ханты-Мансийского автономного округа – Югры с позиции реализации выявленных на теоретическом этапе исследования принципов бережливого производства.

Выводы: автором обосновывается необходимость комплексного подхода к внедрению технологий бережливого производства в систему управления качеством социальных услуг, включающую такие составляющие, как увеличение скорости обработки информации, устранение ряда «типичных» потерь, управления на принципах «системы непрерывных улучшений», а также развитие методов «предвидения».

Ключевые слова: менеджмент образования, государственное управление, оценка качества, лин-технологии, «бережливый регион».

IMPLEMENTATION OF THE APPROACHES OF THE "LEAN REGION" IN THE DEVELOPMENT OF THE SYSTEM FOR ASSESSING THE QUALITY OF EDUCATION OF THE KHANTY-MANSI AUTONOMOUS OKRUG – UGRA

Tatiana A. Grosheva
Candidate of Economic Sciences
Director of the Institute of Academic Design
Yugra State University
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: t_grosheva@ugrasu.ru

Galina V. Diveeva
Candidate of Pedagogical Sciences
Deputy Director of the Autonomous Institution of the Khanty-Mansi Autonomous okrug – Ugra,
Institute for Education Development,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: dgv@iro86.ru

Introduction. Leather-made technologies are becoming increasingly distributed not only in the production sector of Russian enterprises, but also in the system of state and municipal management, proving their effectiveness and effectiveness. The article is attempted to summarize the idea of the implementation of leaning production in the regional management system and the rationale for the integrated system of "leaning" management on the example of an education quality assessment system of the Khanty-Mansi Autonomous okrug – Ugra.

The purpose: is to analyze the implementation of the concept of a "lean region" in the quality management system of education of the of the Khanty-Mansi Autonomous okrug – Ugra.

Methods: The article uses such general scientific research methods as a generalization, analysis and synthesis, concretization.

The results are determined by the main directions for the implementation of the concept of "leaning region" in the system of government quality management of the provision of services of the social sphere. The regional methodology for a comprehensive assessment of the quality of educational results of students of the Khanty-Mansi Autonomous okrug – Ugra is analyzed from the position of the implementation of the proceeding principles identified at theoretical stage.

The conclusions by the author substantiates the need for a comprehensive approach to the implementation of leaning technologies into the system of social services quality management, including such components such as an increase in the rate of information processing, eliminating a number of "typical" losses, management on the principles of "continuous improvement systems", as well as the development of "foresight systems".

Key words: education management, public administration, quality assessment, lean technologies, "lean region".

Введение

Технологии и методы бережливого производства все в большей степени охватывают деятельность экономических агентов, демонстрируя свою результативность и эффективность. Ханты-Мансийский автономный округ – Югра стал одним из «пионеров» России, который на официальном уровне ввел Концепцию «Бережливый регион», ставя целью внедрения технологий бережливого производства в деятельность организаций и учреждений региона, в т. ч. в систему государственного и муниципального управления. Реализуемые на территории

автономного округа элементы системы управления во многом удовлетворяют принципам концепции бережливости. В данной статье проведен анализ становления и развития системы комплексной оценки образовательных результатов школ Югры с позиции принципов бережливого производства. Выявлены текущие проблемы и «потери» системы, сформированы предложения по ее совершенствованию.

Результаты и обсуждение

В современных исследованиях можно выделить ряд работ, в которых рассматриваются вопросы внедрения бережливого производства в практику государственного управления.

Например, в работе Галий Е. А. и Сексяева А. Ю. [1] в качестве перспективного метода бережливого производства применительно к работе государственных органов и учреждений указывается метод Кайдзен – как простая в применении и универсальная практика непрерывного совершенствования процессов производства, разработки, управления и т.п. При этом под бережливым производством в управлении понимается реализация концепции минимизации потерь времени и ресурсов с одновременной максимизацией клиентоориентированности.

С позиции Петровой Л. П. [2] бережливое производство в государственном управлении повышает производительность труда сотрудников и удовлетворенность населения качеством государственных услуг, снижает стоимость их предоставления и сокращает время, затрачиваемое на оказание услуги. Среди целей внедрения бережливого производства в общественном секторе автором указывается также на повышение эффективности управления за счет развития методов «предвидения», предупреждения проблем.

В статье Савицкой И. М. [3] с соавторами на примере совершенствования методами бережливого производства деятельности многофункциональных центров России рассмотрена модель «семи видов потерь» как основа перехода к принципам бережливости. Реализация указанной модели позволяет сформировать нацеленность на устранение потерь в процессе предоставления государственных и муниципальных услуг, среди которых потери перепроизводства, ожидания, брака, излишней обработке и т. п.

В публикации Албастовой Л. Н. и Хашевой И. А. [4] концепция бережливого производства представлена в совокупности трех подсистем – стратегического управления, процессов и персонала, а также соответствующих им трех групп технологий – анализа, улучшений и вовлечения. Авторами отмечается, что бережливое производство в государственном управлении – это прежде всего скорость (максимально быстрая и точная обработка информации и выработка на ее основе управленческих решений). Авторами также указывается на значимость устранения потерь как ключевой цели реализации концепции «бережливого государства», а также приоритет повышения качества оказываемых государственных услуг.

Согласно концепции правительственного лин-центра США (LEAN Government Center), которую принято рассматривать как передовую практику «бережливого государства», бережливое производство в государственном управлении призвано обеспечить увеличение пропускной способности и обслуживания при одновременном снижении затрат и потерь. Ключевой акцент делается на управлении процессами с учетом формируемой ими добеленной стоимости в отношении потребителей-налогоплательщиков и на обеспечении устойчивых (долгосрочных) результатов на основе принципов системного мышления. Так, например, в качестве примеров лин-проектов, направленных на повышение эффективности управления системой образования (школами) приводится проект по исключению дублирующих функций департаментов города и округа, а также проект по анализу «внеклассных» затрат (потерь), связанных с простоем учреждений в свободное от основной работы время.

Проводя обзор международной практики применения концепции «бережливого государства», Царенко А. С. [4] указывает на «включенность» в данную категорию двух составных элементов – оптимизации процессов деятельности органов государственного управления и муниципальной власти, а также повышение эффективности и устойчивости функционирова-

ния предприятий общественного сектора. Со ссылкой на мировой опыт автор характеризует подход «бережливое государство» через оптимизацию ценности для общества, вовлеченность служащих и стейкхолдеров в деятельность по постоянному улучшению, использование модели быстрых постоянных улучшений, нацеленность на снижение сложности процессов и использование средств визуального контроля для оперативной обратной связи.

Таким образом, современные подходы к исследованию реализации концепции «бережливого государства» акцентируют внимание на следующих аспектах:

1) первостепенная значимость минимизации потерь времени – увеличение скорости обработки информации и принятия на ее основе управленческих решений;
2) ориентация на устранение ряда «типичных» потерь в процессе предоставления государственных и муниципальных услуг;
3) построение управления на принципах «системы непрерывных улучшений» с вовлечением всех заинтересованных лиц в деятельность по ее постоянному совершенствованию;
4) развитие методов «предвидения», предупреждения проблемных ситуаций в управляемой системе, включая нацеленность на повышение эффективности и устойчивости функционирования предприятий общественного сектора.

В Концепции «Бережливый регион» в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре [5] в качестве значимых для государственного сектора методов бережливого производства указываются методы, ориентированные на повышение качества услуг и снижение времени их оказания – стандартизация работ, защита от ошибок и потерь, картирование потока создания ценности, реализация инструментов концепции «хороший спрос – плохой спрос» и т. п. В Концепции также акцентируется внимание на потерях, минимизация которых должна обеспечиваться средствами бережливого производства, – запасы, дефекты, излишняя сложность, перепроизводство, ожидания, лишние передвижения и перемещения. Внедрение бережливого производства в государственном (муниципальном) управлении автономного округа помимо ориентации на повышение эффективности и результативности должно способствовать ускорению принятия стратегических решений и улучшению внутрисистемных взаимодействий.

Реализация с 2016 года подходов «бережливого региона» оказала системное воздействие на деятельность органов управления Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. В настоящем исследовании предпринята попытка анализа с позиции принципов «бережливости» становления и развития системы комплексной оценки образовательных результатов обучающихся образовательных организаций Югры (далее – Комплексная оценка).

В 2017 году Ханты-Мансийский автономный округ – Югра присоединился к реализации мероприятий по повышению качества образования в школах с низкими результатами обучения в рамках Федеральной целевой программы развития образования на 2016-2020 годы.

В реализации задачи перевода школ со стабильно низкими образовательными результатами в эффективный режим функционирования значимым (основополагающим) этапом выступает этап идентификации соответствующих групп школ. С 2017 года в Югре разработана и апробирована региональная методика идентификации организаций с низкими образовательными результатами, в основе которой – индекс образовательных результатов (интегрированный показатель совокупности результатов оценочных процедур в образовании, определяющий позиции конкретной школы (профессиональной образовательной организации) относительно других образовательных организаций Югры).

Развитие системы оценивания образовательных результатов в период 2017-2019 годов обусловило необходимость формирования комплексной оценки качества образовательных результатов обучающихся организаций Югры, утвержденной и фактически реализованной в 2019, 2020 и 2021 годах [6].

С позиции реализации подходов «бережливого региона» предусмотренная методикой процедура комплексной оценки образовательных достижений обучающихся школ Югры, пройдя пятилетний этап своего становления, к 2021 году обеспечивает:

в части ориентации на устранение потерь в процессе предоставления государственных и муниципальных услуг – использованием программного модуля платформы «Региональный мониторинг», который существенно упрощает доступ организаций как к первичным данным Комплексной оценки (формируемым преимущественно из официальных отчетов по итогам соответствующих оценочных процедур), так и к итоговым результатам Комплексной оценки. В результате происходит минимизация таких видов потерь, как:

- «дефекты» (ошибки и пропуски данных верифицируются при необходимости самими оцениваемыми организациями путем согласования),
- «перепроизводство» (исключается лишняя переписка, подготовка дублирующих отчетов и копий подтверждающих документов; большинство сведений системы первоначально «выгружается» из официальных отчетов на уровне регионального оператора и не требует участия оцениваемых организаций,
- «излишняя сложность процессов» (происходит исключение дублирующих функций регионального и муниципального уровней управления),
- «лишнее перемещение» (исключается излишний документооборот).

1) в части минимизации потерь времени, увеличения скорости обработки информации и принятия на ее основе управленческих решений – учет показателей Комплексной оценки нарастающим итогом по совокупности результатов оценочных процедур за последние 3 учебных года, предшествующих текущему. Т. е. фактически ежегодная оценка обновляется только на один год из трех оцениваемых, что существенно увеличивает скорость получения итоговых результатов, исключает фиксацию резких изменений и формирует основу принятия оперативных управленческих решений. Так, например, при проведении Комплексной оценки 2021 года в система оценивания была дополнена только 35-ю показателями за 2020–2021 учебный год из 105 используемых за последние три года.
2) в части построения управления на принципах «системы непрерывных улучшений» с вовлечением стейкхолдеров – использованием в основе Комплексной оценки индекса образовательных результатов – интегрального показателя образовательных результатов обучающихся, формируемого по каждой образовательной организации Югры по совокупности оценочных процедур государственной итоговой аттестации, всероссийских проверочных работ, результатов всероссийской олимпиады школьников, региональных диагностических работ и, в качестве исключения 2020 и 2021 годов, диагностических работ в 10-х классах и контрольных работ в 9-х классах соответственно. С одной стороны, процедурами Комплексной оценки предусмотрено ежегодное установление весовых коэффициентов утвержденных групп показателей через процедуру общественного обсуждения из целей и задач образовательной политики на текущем этапе развития. Это обеспечивает вовлечением стейкхолдеров в процесс принятия управленческих решений и их заинтересованность в дальнейшем использовании результатов оценки. С другой стороны, использование в Комплексной оценке образовательных достижений индекса образовательных результатов как суммы именно нормированных показателей обеспечивает следующие преимущества:

- возможность формирования относительных позиций организации по совокупности образовательных результатов среди других оцениваемых организаций (например, если по конкретной оценочной процедуре организация получила среднюю оценку 4, но данная оценка ниже средних оценок других организаций, позиции школы будут относительно низкими);

- возможность ежегодного пересмотра состава показателей как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения в зависимости от числа используемых оценочных процедур без существенного влияния на итоговый результат оценки;
- возможность использования в оценке значительного числа оценочных процедур без обязательного требования к обеспечению 100-го охвата организаций;
- возможность проведения сопоставлений относительных образовательных результатов школ различного уровня (например, основных и средних общеобразовательных организаций);
- возможность реализации рекомендаций по повышению объективности оценки образовательных результатов Федеральной службы по надзору в сфере образования и науки от 16.03.2018 № 05-71 [7] в части исключения необъективных результатов без существенного влияния на совокупное качество оценки;
- возможность ежегодно фиксировать образовательные организация с относительно высокими и низкими образовательными результатами и ориентировать управленческое воздействие в «системе непрерывных улучшений» на поддержку последних; при этом кризисными ситуациями будут признаваться лишь случае стабильно низких на протяжении 3-х лет образовательных результатов, минимизация и исключение которых будет свидетельствовать об эффективности системы управления качеством образования в традиционном ее понимании.

3) в части развития методов «предвидения», предупреждения проблемных ситуаций в управляемой системе – выявление «зон риска»: школ с резкой дифференциацией средних показателей образовательных результатов в рамках различных оценочных процедур и/или неустойчивостью средних показателей образовательных результатов в динамике, а также с использованием методики Высшей школы экономики [8] групп школ:
   - «эффективных» – с одновременно высокими значениями индекса социального благополучия и индекса образовательных результатов, т.е. демонстрирующих относительно высокое качество образования при благоприятных социальных условиях;
   - «резильентных» – с низким значением индекса социального благополучия при одновременно высоком значении индекса образовательных результатов, т.е. демонстрирующих относительно высокое качество образования при неблагоприятных социальных условиях;
   - «несправляющихся» – с высоким значением индекса социального благополучия и одновременно низким значением индекса образовательных результатов, т.е. при благоприятных социальных условиях не обеспечивающих надлежащее (относительно других организаций) качество образования;
   - «депривированных» – с одновременно низким значением индекса социального благополучия и индекса образовательных результатов.

Комплексная оценка позволяет не только решать задачи по идентификации школ, имеющих стабильно высокие и стабильно низкие образовательные результаты обучающихся, и выявлению школ «зон риска», но и определять школы, демонстрирующие положительную динамику развития, результативные управленческие и педагогические практики которых, значимые с позиции диссеминации.

На основе подобного анализа, с одной стороны, фиксируются не только кризисные, но и потенциально проблемные ситуации в обеспечении качества образования, а система управления получает возможность работать на предупреждение их развития в кризисные. С другой стороны, система взаимодействий школ в логике непрерывных улучшений обеспечена возможностью использования выявленных эффективных практик повышения качества образования, применимость которых к конкретной образовательной организации обязательно учитывает контекстные характеристики (рисунок 1)

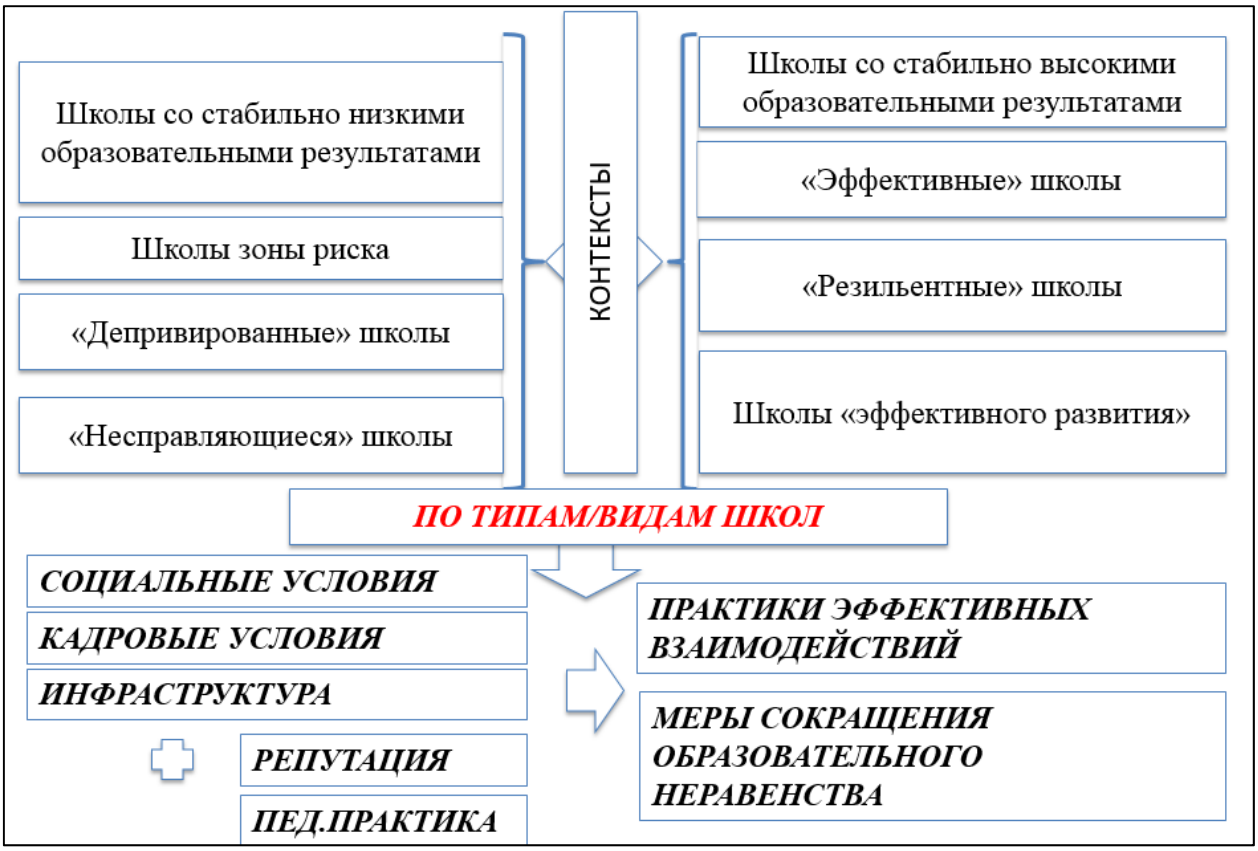


Рисунок 1. Схема взаимодействия в системе непрерывных улучшений качества общего образования Югры

Исследования в области управления качеством образования неизменно доказывают, что социальные, инфраструктурные и кадровые контексты в деятельности организаций имеют значение. Масштаб населенного пункта, количество обучающихся непосредственно в самой образовательной организации, уровень квалификации педагогов, специфику контингента обучающихся и реализуемых образовательных программ необходимо учитывать при принятии управленческих решений и имплантации педагогических практик при реализации задачи перехода образовательной организации в эффективный режим функционирования.

Применение контекстного анализа, в свою очередь, формирует возможности организаций эффективной системы взаимодействия образовательных организаций в региональном пространстве, ориентированных на повышение качества общего образования.

Заключение и выводы

Представленный пример развития технологий бережливого производства является далеко не единственным в системе управления образованием Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, однако, именно он позволяет комплексно представить реализацию принципов «бережливого региона» по одновременно 4-м наиболее важным направлениям рационализации производства и управления качеством – увеличение скорости обработки информации, устранение ряда «типичных» потерь, управления на принципах «системы непрерывных улучшений», а также развитие методов «предвидения» (предупреждения проблемных ситуаций). Соглашаясь с выводами Кузнецова А. И. [9], акцентирующего внимание на качестве образования как основной создаваемой ценности образовательных организаций, следует согласиться, что применение инструментов бережливого производства в управлении образованием обеспечивает формирование (и совершенствование) непрерывного потока создания ценности образовательных услуг.

Однако, дополняя тезисы Давыдовой Н. С. [9], что «эффективный регион» проявляется не только в повышении эффективности органов государственного управления в обеспечении повышения удовлетворенности населения путем сокращения потерь взаимодействия населения с органами власти и организациями общественного сектора с применением методов бережливого производства, но и путем организации эффективных взаимодействий и работы в системе непрерывных улучшений между органами власти и организациями, оказывающими оказание социальных услуг.

Именно системный подход к развитию технологий бережливого производства в отраслях социальной сферы формирует сегодня потенциал роста эффективности в управлении повышением качества.

Список литературы

1. Галий, Е. А. Применение методов бережливого производства в государственном управлении / Е. А. Галий, А. Ю. Сексяев. – Текст : непосредственный // Перспективы развития науки и образования : сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции, Тамбов, 30 декабря 2017 года. – Тамбов : Консалтинговая компания Юком, 2017. – С. 40–45.

2. Петрова, Л. Б. Бережливое производство как один из инструментов менеджмента качества в государственном управлении Российской Федерации / Л. Б. Петрова. – Текст : непосредственный // Science Time. – 2019. – № 10(70). – С. 47–49.

3. Савицкая, И. М. Реализация концепции «бережливое производство» в сфере оказания государственных и муниципальных услуг / И. М. Савицкая, С. В. Горбанев, И. В. Андреева. – Текст : непосредственный // Новые технологии. – 2018. – № 2. – С. 85–93.

4. Царенко, А. С. «Бережливое государство»: перспективы применения бережливых технологий в государственном управлении в России и за рубежом / А. С. Царенко. – Текст : непосредственный // Государственное управление. Электронный вестник. – 2014. – № 45. – С. 74–109.

5. О концепции "бережливый регион" в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре : распоряжение Правительства Ханты-Мансийского автономного округа – Югры от 19 августа 2016 года № 455-рп : (в редакции распоряжений Правительства ХМАО – Югры от 27.01.2017 № 34-рп, от 20.04.2018 № 176-рп). – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/429064584 (дата обращения: 20.02.2022).

6. Методика комплексной оценки качества образовательных результатов обучающихся образовательных организаций, расположенных на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. – Текст : электронный // Институт развития образования Югры. – URL: https://iro86.ru/imagesМетодика_комплексной_оценки_качества_образования_2021.pdf (дата обращения: 20.02.2022).

7. О направлении рекомендаций по повышению объективности оценки образовательных результатов : письмо Федеральной службы по надзору в сфере образования от 16.03.2018 № 05-71. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/557087324 (дата обращения: 20.02.2022).

8. Ястребов, Г. А. Использование контекстных данных в системе оценки качества образования: опыт разработки и апробация инструментария / Г. А. Ястребов, М. А. Пинская, С. Г. Косарецкий. – Текст : непосредственный // Вопросы образования. – 2014. – № 4. – С. 58–95.

9. Технологии бережливого производства в системе образования / составитель О. А. Суйкова. – Текст : непосредственный // Инновационное развитие профессионального образования. – 2021. – № 3 (31). – С. 170–183.

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 г. Выпуск 1 (64). С. 155–165

УДК 33:39;908
DOI: 10.18822/byusu202201155-165

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ КМНС СЕВЕРНЫХ И АРКТИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ РОССИИ И МИРА

Михайлюк Оксана Николаевна
доктор экономических наук,
профессор кафедры стратегического и производственного менеджмента
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»
Екатеринбург, Россия
E-mail: O_Mikhajluk@mail.ru

Бурундукова Елена Михайловна
кандидат экономических наук,
директор Института цифровой экономики
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: burundukova@mail.ru

В последнее десятилетие в связи с промышленным освоением северных и арктических территорий встает вопрос о сохранении самобытной уникальной культуры коренных малочисленных народов Севера (КМНС), ведущих племенной и полуплеменной образ жизни. Актуальными в свете возросшего значения арктических территорий северных стран сегодня являются вопросы защиты социальных прав КМНС, в том числе сохранение традиционного природопользования и жизнедеятельности этнокультурных сообществ. С конца 1980-х гг. по настоящее время приняты важные международные правовые акты в отношении народов, ведущих племенной и кочевой образ жизни: Международная конвенция № 169 Международной организации труда (1989 г.); Декларация Кари-Ока и Хартия аборигенных народов мира (1992 г.); Конвенция ООН о биологическом разнообразии (1993 г.); Декларация ООН о правах коренных народов (2007 г.). Данные нормативно-правовые акты существенно повысили рейтинг КМНС, возведя проблему их сохранения на уровень общемирового значения, и обусловили необходимость разработки политики поддержки. Рассмотрим опыт поддержки КМНС на примере стран, где удельный вес такого населения занимает значительную долю (Канада и Норвегия), а также опыт северных территорий России.

Ключевые слова: Арктическая зона, программы устойчивого развития КМНС, этнокультурное сообщество.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE IMPLEMENTATION OF THE PROGRAMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE SIPN IN THE NORTHERN AND ARCTIC REGIONS OF RUSSIA AND THE WORLD

Oksana N. Mikhailyuk
Doctor of Economic Sciences,
Professor of the Department of Strategic and Production Management,
Ural State Mining University,
Yekaterinburg, Russia
E-mail: O_Mikhajluk@mail.ru

Elena M. Burundukova
Candidate of Economic Sciences,
Director of the Institute of Digital Economy,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: burundukova@mail.ru

In the last decade, in connection with the industrial development of the northern and Arctic territories, the question arises of preserving the original unique culture of the indigenous peoples of the North (Indigenous Peoples of the North), leading a tribal and semi-tribal way of life. Topical in the light of the increased importance of the Arctic territories of the northern countries today are the issues of protecting the social rights of the indigenous peoples, including the preservation of traditional nature management and the life of ethno-cultural communities. Since the late 1980s to date, important international legal acts have been adopted regarding peoples leading a tribal and nomadic lifestyle: International Convention No. 169 of the International Labor Organization (1989); Kari-Oka Declaration and Charter of the World's Aboriginal Peoples (1992); UN Convention on Biological Diversity (1993); United Nations Declaration on the Rights of Indigenous Peoples (2007). These legal acts significantly increased the rating of the indigenous peoples of the North, raising the problem of their preservation to the level of global importance, and necessitated the development of a support policy. Let us consider the experience of supporting indigenous peoples on the example of countries where the proportion of such a population occupies a significant share (Canada and Norway), as well as the experience of the northern territories of Russia.

Keywords: Arctic zone, indigenous peoples' sustainable development programs, ethno-cultural community.

Специфика северных и арктических территорий заключается в уникальном природно-ресурсном и значительном человеческом потенциале с особой этнической структурой, обусловленной жизнедеятельностью КМНС, среди которых можно отметить инуитов (Канада), эскимосов, алеутов, инуипаков (Аляска), гренландских эскимосов (Гренландия), саамов (Норвегия, РФ, Швеция), чукчей, эвенков, нанайцев, ульчей, удэгейцев (Российская Федерация) и множество других [1].

К коренным народам Севера можно отнести:

1) представителей титульных наций, проживавших в регионе на момент установления современных государственных границ: русские, датчане, норвежцы, финны, шведы, фарерцы;
2) коренные малочисленные народы (в европейской интерпретации коренные народы, ведущие племенной и полуплеменной образ жизни): эскимосы Аляски, Канады, Гренландии, североамериканские индейцы (тлинкиты, атапаски, хайда, семшиане), саамы Норвегии, Швеции, Финляндии, России, вепсы, ненцы, селькупы, нганасаны, чукчи, эвены, эвенки, долганы, ительмены, чуванцы;
3) коми и якутов, численность которых превышает 50 тыс. человек [2].

В соответствии со ст. 1 Федерального закона № 82 от 30.04.1999 г. коренные малочисленные народы РФ – народы, проживающие на территориях традиционного расселения своих предков, сохраняющие традиционный образ жизни, хозяйственную деятельность и промыслы, насчитывающие в Российской Федерации менее 50 тысяч человек и осознающие себя самостоятельными этническими общностями [3].

Мировая статистика по подсчету численности коренных малочисленных народов, проживающих в северных (арктических) регионах, довольно приблизительна, основана на сведениях из переписи населения, из спутниковых снимков (таблица 1) [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

Таблица 1 – Численность и доля коренных малочисленных народов в населении стран, имеющих арктические регионы (на начало 2021 г.)

Страна	Численность населения, тыс. чел.		Удельный вес, %		Территории Арктической зоны
	страны	Арктической зоны	коренных народов	КМН в Арктической зоне	
Исландия	356,9	288,5	86,2	-	Исландия
Дания	5 822,8	48,67	-	0,1	Фарерские острова
США	335 028,2	731,6	1,2	14,9	Аляска
Канада	38 254,5	130,3	3,8	50,8	Арктическая Канада
Гренландия	56,22	56,22	88	88	Гренландия
Норвегия	5 265,8	462,7	1,2	12,9	Арктическая Норвегия
Швеция	10 214,1	253,6	0,2	9,9	Арктическая Швеция
Финляндия	5 328,9	187,8	0,1	3,7	Арктическая Финляндия
Россия	146 748,2	2 371,3	-	4,1	арктические регионы
Всего	х	4 530,69	х	8,0-8,5	х

Следует отметить, что во всем мире численность коренных малочисленных народов Арктики (Севера) составляет более 4530 тыс. человек, в среднем 8,0-8,5 % всего населения Арктики. Удельный вес КМНС среди населения Арктической зоны превышает средние значения лишь в Гренландии, где аборигенное население составляет 88 % населения страны, Высокие значения имеют Аляска – 14,9 %, Арктическая Канада – 50,8 %. В России показатели уступают вышеуказанным странам (4,1 %), однако отдельные субъекты РФ также имеют высокую долю КМНС среди населения территории: в Таймырском районе Красноярского края – 24,8 %, в Ненецком и Чукотском автономных округах Российской Арктики – 18,7 и 31,3 % соответственно.

В результате устоявшегося традиционного уклада жизни люди полностью зависят от арктической экосистемы в вопросах питания, проживания и сохранения самобытности культуры. Традиционными промыслами являются охота, собирательство, оленеводство и рыболовство. Природная среда является основой жизни для народов Севера, поэтому экологические проблемы приобретают для них особенную остроту. Промышленное освоение северных территорий и Арктики может привести к уничтожению исконной среды обитания и создать угрозу исчезновения малочисленных народов Севера как самостоятельных этносов.

Утрате самобытной уникальной культуры способствуют следующие причины:

1) ежегодно сокращается численность КМНС по причинам захвата их территорий, уменьшения ореола обитания, снижения численности животного и растительного мира, миграции КМНС из региона присутствия и проч.;
2) снижается доля КМНС в общей численности населения страны / региона, поэтому их культура подавляется культурой и ценностями более многочисленных групп населения;
3) средства массовой информации ориентированы преимущественно на публикацию информации на общегосударственном языке для представителей культурного большинства, что делает сохранение собственного языка и этноса, обмен информацией между КМНС затруднительным;
4) племенной и полуплеменной образ жизни в наше время является малоэффективным по сравнению с жизнью в городах и обустроенных поселениях, люди такого образа жизни имеют меньшую продолжительность жизни и более высокую детскую смертность, что не позволяет популяризировать подобный жизненный уклад.

В целях проведения анализа возьмем территории, схожие по экономическому формированию ВВП (ВРП) за счет доходов от нефтегазовой отрасли (Канада, Норвегия), со стороны России – Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО), Ханты-Мансийский автономный округ (ХМАО-Югра), Республика Саха (Якутия).

Канада имеет обширные северные территории (40 % территории Канады считается арктической и северной), состоящие из северо-западных территорий, Нунавута, Юкона и северных частей нескольких провинций. В Канадской Арктике проживает 130,6 тыс. человек, из которых более половины (50,8 %) являются коренными жителями. Несмотря на то, что канадский арктический регион огромен, в нем проживает менее 1 % населения Канады.

Малочисленные коренные народы, проживающие в северной части Канады: атабаски, инуиты, гвичины, анишинаабе, микмаки, монтанье, наскапи. Народы атабасков и гвичинов в Канаде живут в основном на северо-западных территориях и Юконе. Инуиты в Канаде проживают в 53 общинах инуитов Нунангат – северных районах Канады, в Квебеке живут анишинаабе, микмаки, монтанье, наскапи [13].

В целом Конституция Канады признает 3 группы коренного населения – индейцев, метисов и инуитов; права коренных народов Канады находятся под защитой Конституции страны с 1982 г.

Институты, решающие вопросы коренных народов: Департамент по делам аборигенов и развитию северных территорий Канады (Aboriginal Affairs and Northern development Canada – AANDC), Канадский отдел по связям с коренными народами и делам северных территорий (CIRNAC), Служба коренных народов Канады (ISC) [14]. Целью деятельности AANDC является поддержка участия коренных народов и населения северных территорий в общественной жизни и в социально-экономическом развитии Канады.

Ключевые направления политики поддержки коренных малочисленных народов Севера в Канаде:

1) развитие детей и молодежи, включая решение социальных, экологических и экономических проблем;
2) развитие партнерских отношений и сотрудничества с коренными народами и арктическими государствами для решения общих проблем и возможностей;
3) поддержка психического здоровья в арктических сообществах;
4) защита окружающей среды, живой природы Арктики, биологической продуктивности;
5) предоставление возможностей коренных народов стать равными и значимыми участниками в северной и национальной экономике и обществе [12].

В рамках бюджета в 2018–2020 гг. на нужды развития северных территорий были выделены следующие средства (таблица 2) [15]:

Таблица 2 – Финансирование развития северных территорий Канады

Направление финансирования	**Год выделения средств**	**Сроки, лет**	**Сумма, млн. долл.**
Развитие учреждений высшего образования	2019	5	58
Развитие транспортных коммуникаций в Арктике	2019–2020	8	400
Поддержка изолированных сообществ коренных жителей и диверсификация экономического развития северных территорий	2020	5	90
Развитие добычи углеводородного сырья на континентальном шельфе в Северном Ледовитом и Атлантическом океанах	2018	5	17,9
Развитие телемедицины на Севере	2020	-	14
Развитие здравоохранения	2019	5	220
Развитие образования среди инуитов	2019–2020	10	125,5

Кроме финансирования конкретных программ на развитие северных территорий северным провинциям Канады выделяются средства из федерального бюджета (таблица 3) [16]:

Таблица 3 – Федеральные дотации в структуре бюджета северных территорий Канады

Территория	**Сумма, млн. долл. / доля в общем бюджете, %**				
	2016 г.	**2017 г.**	**2018 г.**	**2019 г.**	**2020 г.**
Нунавут	1487 / 88,83	1527 / 88,62	1576 / 88,39	1610 / 87,98	1676 / 87,32
Юкон	945 / 80,56	961 / 81,72	991 / 80,70	1018 / 80,22	1060 / 79,52
Северо-западные территории	1344 / 67,78	1404 / 68,06	1425 / 65,70	1456 / 64,40	1453 / 62,41

Благодаря государственной поддержке северных территорий и коренных народов Канады за 10 лет наблюдается рост общего объема ВРП трех северных территорий, почти двукратный рост экономики в этих провинциях. Несмотря на позитивную динамику совокупного ВРП, Нунавут, Юкон и северо-западные территории остаются регионами с низкой долей регионального продукта в ВВП страны. За рассматриваемый период этот показатель снизился с 0,53 до 0,51 %.

При этом положительную динамику по демографии наблюдают на всех трех территориях, прирост численности населения за 10 лет составил 24 %, выше среднего по стране (14 %), в том числе увеличивается численность коренных малочисленных народов Северной Канады. Определенный прогресс в обеспечении равных возможностей для образования можно проследить по доле коренных жителей северных провинций, не закончивших школу, которая снизилась за 10 лет с 42 до 18 % [17].

Таким образом, реализуемые в Канаде программы поддержки КМНС в рамках комплексного социально-экономического развития северных и арктических территорий проводят через прямые финансовые дотации. Данные финансовые инструменты обеспечивают поддержание уровня жизни КМНС, сопоставимого со средними показателями по стране с точки зрения основных социально-экономических индикаторов. Проблемой является недоступность статистических данных по многим показателям социально-экономического развития для северных территорий (не публикует актуальной информации по здравоохранению, уровню доходов населения, неравенству, инфраструктурному строительству для северных территорий).

Рассмотрим опыт поддержки КМНС на примере Норвегии.

В территории Норвегии 50 % – это арктическая территория, состоящая из двух губерний – Нурланн и объединенных губерний Тромс и Финмарк на материке, архипелага Шпицберген и острова Ян-Майен. В норвежской Арктике проживает примерно 490 000 чел. – 10 % от всего населения Норвегии.

Коренное северное население Норвегии – саамы, которые проживают в Сапми – области, простирающейся вдоль северных областей Норвегии, Швеции, Финляндии и России. Оценки численности саамов варьируются от 50 до 80 тысяч людей, причем наиболее концентрированные поселения – в Северной Норвегии.

Ключевые направления политики поддержки коренных малочисленных народов Севера в Норвегии:

1) интегрированное управление норвежских правительственных органов и представителей КМНС ресурсами в таких областях, как рыболовство, горнодобывающая промышленность, морской транспорт, нефть и экономика;
2) экологические вопросы, связанные с климатическими изменениями, выбросами вредных веществ;
3) защита морской среды;
4) сохранение биологического разнообразия;
5) социальное здоровье, здоровье человека и экономическое развитие с учетом интересов коренных народов Арктики [18].

В правительстве Норвегии основная ответственность за дела саамов, включая распределение средств, возложена на Министерство труда и социальной интеграции. Финансирование Саамского парламента предоставляется норвежским государством по различным статьям национального бюджета. Но парламент может распределить полученные средства в соответствии со своими приоритетами.

Кроме того, парламент контролирует «Samefolkets fond» – фонд, созданный в 2000 году в качестве компенсации за предыдущую политику правительства по «норвегизации» саамского населения.

Общий бюджет норвежского парламента саами на год составляет примерно 500 млн норвежских крон (таблица 4) [20, с. 12-14].

Таблица 4 – Финансирование и распределение бюджета Саамского парламента норвежским государством, млн норвежских крон

Показатели финансирования	**2016 г.**	**2017 г.**	**2018 г.**	**2019 г.**	**2020 г.**
Общие ассигнования Парламенту саами	464,28	487,32	491,15	497,07	512,86
Распределение экономической базы саамского парламента					
Оперативное управление	35,41	37,16	37,45	39,79	39,11
Выплата грантов	265,35	278,52	280,71	292,97	293,12
Меры для развития территорий, окружающей среды и климата	144,79	151,98	153,17	145,41	159,39
Проведение конференций	0,77	0,81	0,81	0,85	1,4
Другие меры в области прав саами и ресурсы	17,96	18,85	19,00	18,05	19,84

Финансовые инструменты Парламента Саами включают прямые гранты организациям и учреждениям, различные схемы грантов для заявителей, соглашения, проекты, конференции и оценки. Выделение грантов осуществляется по следующим направлениям:

- гранты на двуязычие муниципалитетам;
- гранты на развитие саамского языка;
- языковая стипендия для высшего образования – языковой грант;
- гранты на обучение саамскому языку в детских садах;
- грант на разработку педагогического материала для детских садов;
- субсидирование развития саамских детских садов;
- содержание саамов в школе;
- развитие сети совместного обучения саами;
- развитие средств правовой защиты саами;
- гранты на разработку учебных пособий;
- прочие направления субсидирования программ обучения, здравоохранения, инфраструктуры среды обитания саами.

Таким образом, права коренных малочисленных народов Норвегии получили как международно-правовое, так и конституционное признание. Они выделяются государством в отдельную группу с особыми правами, которые реализуются посредством самостоятельных представительств меньшинств. Правительством проводится активная политика по сохранению культуры, языка и знаний саамов и расширению их прав на земле своего проживания [19, с. 48].

Саамы Норвегии занимают одно из лучших положений в мире среди других коренных народов в контексте их прав и самостоятельности. Культурная политика правительства Норвегии открывает для них все больше возможностей, коррелируя их с наступающим цифровым миром. Формируется качественное исследовательское сообщество, поощряются исследовательские инициативы и сотрудничество между учеными, государственными органами и деловым сектором. Поэтому, безусловно, выстроенную политику на данном этапе можно считать успешной в реализации прав и решении проблем КМНС.

Рассмотренный зарубежный опыт направлений и институтов поддержки КМНС на примере стран Канады и Норвегии представлен в таблице 5. Выделим основные ключевые показатели поддержки КМНС в этих странах.

Таблица 5 – Сравнительная характеристика показателей программ поддержки КМНС в Канаде и Норвегии

Показатели сравнения	**Канада**	**Норвегия**
Численность КМНС, тыс. чел.	примерно 66	50-80
Доля КМНС в общей численности населения, %	0,176	1,21
Основные направления политики поддержки КМНС	Механизмы самоуправления общин коренных народов; программы комплексного социально-экономического развития арктических территорий с поддержкой КМНС; прямые финансовые дотации; функционирование канадских отделов по связям с коренными народами и делам северных территорий	Конституционное признание прав КМНС; выделение КМНС государством в отдельную группу с особыми правами, которые реализуются посредством самостоятельных представительств меньшинств (Саамский парламент); финансирование деятельности Саамского парламента
Объем финансирования поддержки КМНС в 2020 г., млн долл.	4 189	60,11
Доля финансирования поддержки КМНС в ВВП страны в 2020 г., %	0,000242	0,0149
Ключевые показатели стратегии поддержки КМНС	1) увеличение населения – не менее чем на 10 % в год; 2) снижение уровня безработицы – до 6,5 % к 2025 г.; 3) повышение уровня образования населения – до 95 % к 2025 г.; 4) увеличение доли экономически активного населения – до 75 % к 2025 г.; 5) увеличение средней продолжительности жизни населения, повышение доступности медицинской помощи	1) развитие саамского языка (повышение доли носителей саамского языка); 2) развитие цифровой инфраструктуры (документация всех знаний и языков саамов); 3) развитие транспортной инфраструктуры в Арктике – выделяется 400 млрд норвежских крон; 4) поддержка саамов в других странах Севера; 5) снижение загрязнения окружающей среды в Арктике

Рассмотрим основы финансирования программ поддержки КМНС и возможности применения зарубежного опыта поддержки КМНС в Российской Федерации на примере ХМАО-Югры, ЯНАО, Якутии.

Сравнительный анализ программ поддержки КМНС в северных регионах в разрезе объёмов финансирования и выполнения целевых показателей представлен в таблицах 6, 7.

Таблица 7 – Сравнительный анализ программ поддержки КМНС в северных регионах (ХМАО, ЯНАО, Якутия) по объёмам финансирования за 2020 г.

Регион	**Объем финансирования (тыс. руб.)**		
	План	**Факт.**	**% выполнения**
Республика Саха (Якутия)	167 131,74	166 745,39	99,77
ЯНАО	3 106 149,00	3 101 608,00	99,85
ХМАО-Югра	591 171,50	589 112,47	99,65

Из таблицы следует, что Ямало-Ненецкий автономный округ занимает лидирующую позицию по объёму финансирования (более 3 млрд руб.), направленного на поддержку коренных малочисленных народов Севера. Фактически за 2020 год было освоено 3 101 608 тыс. руб. (99,85 % от предусмотренного объёма). На втором месте ХМАО-Югра с объемом финансирования более 589 млн руб. и на третьем Якутия – более 166 млн руб.

Программами устойчивого развития КМНС каждого из вышеперечисленных субъектов РФ предусмотрено выполнение целевых показателей. Отдельные показатели отражают специфику территории, но есть показатели, присущие деятельности всех КМНС (таблица 7).

Таблица 8 – Сравнительный анализ программ поддержки КМНС в северных регионах (ХМАО, ЯНАО, Якутия) по выполнению целевых показателей за 2020 г.

Наименование целевого показателя (индикатора)	**Якутия**			**ЯНАО**			**ХМАО-Югра**		
	План	**Факт.**	**%**	**План**	**Факт.**	**%**	**План**	**Факт.**	**%**
Племенное условное маточное поголовье сельскохозяйственных животных, тыс. голов	11,1	16,5	148	3,5	3,9	113	0,7	0,8	123
Доля трудоустроенных КМНС в общей численности граждан, обратившихся в органы службы занятости населения в местах традиционного проживания и традиционной хозяйственной деятельности КМНС, %	52,0	55,0	105	59,0	65,00	110	55,0	45,0	82
Доля КМНС, удовлетворенных качеством реализуемых мероприятий, направленных на поддержку экономического и социального развития КМН, в общем количестве опрошенных лиц, относящихся к КМНС, %	56,00	56,0	100	31,00	45,00	145	31,0	49,3	159
Количество общин и иных объединений КМН, получивших поддержку на развитие традиционных отраслей хозяйства, ед.	6	7	117	5	14	280	90	90	100
Число грантов в сфере сохранения исконной среды обитания и традиционного образа жизни КМНС, ед.	7	7	100	9	9	100	0	4	100
Количество граждан из числа КМНС, получивших государственную поддержку в улучшении жилищных условий, чел.	2	2	100	3	3	100	15	13	87

Аккумулируя вышесказанное, можно резюмировать, что сравнительный анализ программ поддержки КМНС в северных регионах (ХМАО, ЯНАО, Якутия) по объёмам финансирования и выполнению целевых показателей за 2020 год показал, что опыт ЯНАО в гармонизации межнациональных отношений можно признать лучшим среди представленных регионов.

Правительство ЯНАО, как было указано выше, планирует много бюджетных средств в поддержку и развитие КМНС, их культурного наследия, традиционного образа жизни. У региона очень успешный опыт по развитию кочевого образования. Особо можно отметить налаженную работу с крупными недропользователями. В ЯНАО, в отличие от других регионов, данный процесс работает очень системно.

Анализируя основные показатели программы по устойчивому развитию КМНС, можно отметить незначительный перечень целевых показателей развития КМНС в ХМАО-Югре. К таким показателям (на основе анализа программ поддержки коренных народов Севера в Канаде и Норвегии) можно добавить:

1) уровень безработицы среди коренных малочисленных народов Севера (и, соответственно, необходимость его снижения);
2) продолжительность жизни КМНС в регионе (необходимость его роста);
3) количество лиц среди коренных малочисленных народов Севера в возрасте 20–30 лет, получивших высшее и профессиональное образование;
4) количество медицинских пунктов на территории проживания КМНС и их доля на 100 человек;
5) количество детских садов и школ на территории проживания КМНС и их доля на 100 человек;
6) доля экономически активного населения в регионе (увеличение доли до 60-70 %);

7) развитие транспортной инфраструктуры в регионе (количество и длина построенных автодорог);
8) показатели снижения загрязнения окружающей среды.

Хорошим примером поддержки КМНС в РФ являются механизмы их поддержки в Ямало-Ненецком автономном округе.

Так, уставом ЯНАО гарантируются права КМНС, объединений названных народов и лиц, к ним относящихся, в том числе право на защиту их исконной среды обитания, традиционных образа жизни, хозяйствования и промыслов, на сохранение и развитие своей самобытной культуры; при этом органы государственной власти автономного округа в пределах своих полномочий вправе устанавливать для их обеспечения дополнительные гарантии.

Особенностью уставного регулирования статуса КМНС в ЯНАО является сохранение и развитие традиционных видов хозяйственной деятельности, что выступает предметом совместных программ, разрабатываемых органами государственной власти автономного округа и органами государственной власти иных субъектов РФ, расположенных в Арктической зоне РФ. Вместе с задачами сохранения традиционного образа жизни, промыслов и самобытной культуры коренных и малочисленных народов определяет содержание мер, направленных на социально-экономическое развитие автономного округа.

В ЯНАО не было создано ни одной территории традиционного природопользования, но округ считается одним из показательных среди других субъектов РФ, где проживают КМНС [12].

Лидером по добыче нефти и газа в ЯНАО является Пуровский район, где при участии администрации Пуровского района была выстроена система взаимоотношений добывающих компаний с коренными малочисленными народами через создание акционерных обществ, при поддержке которых представители коренных малочисленных народов занимаются выловом рыбы, охотой, сбором дикоросов, выпасом оленей. Администрация Пуровского района курирует вопросы дальнейшей обработки и реализации продукции.

Таким образом, анализируя недостатки существующих программ развития КМНС и положительную практику поддержки КМНС в других странах, можно предложить следующие мероприятия по повышению эффективности финансирования КМНС:

1) повысить общественный контроль за расходованием средств, выделяемых по программам устойчивого развития КМНС в регионах России;
2) расширить полномочия Ассамблеи представителей коренных малочисленных народов Севера, широко транслировать ее возможности, привлекать новых членов;
3) улучшить систему информирования коренных малочисленных народов Севера по возможностям государственных субсидий, компенсаций, материальной и прочей помощи;
4) добавить в программы по устойчивому развитию КМНС дополнительные ключевые показатели развития КМНС в регионе, которые необходимо достигнуть к 2030 г. (уровень безработицы, доступность медицинской помощи, доступность образования, доля экономически активного населения, развитие транспортной инфраструктуры, продолжительность жизни, показатели снижения загрязнения окружающей среды);
5) расширение территориальных прав коренных малочисленных народов Севера в регионе;
6) регулярные опросы представителей региональной и местной власти жителей северных территорий с выявлением их проблем, нужд, планов на жизнь, необходимых мер поддержки.

Список литературы

1. Корчак, Е. А. Коренные народы Севера в государственных арктических стратегиях / Е. А. Корчак. – Текст : электронный // Современные проблемы науки и образования. – URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=10096 (дата обращения: 25.11.2021).

2. Соколова, Ф. Х. Коренные малочисленные народы Арктики: концепт, современное состояние культуры / Ф. Х. Соколова. – Текст : электронный // Арктика и Север. – 2013. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/korennye-malochislennye-narody-arktiki-kontsept-sovremennoe-sostoyanie-kultury (дата обращения: 25.11.2021).

3. О гарантиях прав коренных малочисленных народов Российской Федерации : федеральный закон от 30.04.1999 № 82-ФЗ. – Текст : электронный // Гарант. – URL: https://base.garant.ru/180406/ (дата обращения: 25.11.2021).

4. Доклад о развитии человека в Арктике. – Текст : электронный // Stofnun Vilhjálms Stefánssonar. – URL: http://www.svs.is/ahdr/ahdr%20chapters/russian%20version/02_Demographia.pdf (дата обращения: 25.11.2021).

5. Население Исландии. – Текст : электронный // Statistics Iceland. – URL: http://www.statice.is/statistics/population (дата обращения: 25.11.2021).

6. Rosenberg, M. Current Population of the United States / M. Rosenberg // ThoughtCo. – URL: http://geography.about.com/od/obtainpopulationdata/a/uspopulation.htm (date of application: 25.11.2021).

7. The Canadian Population in 2011: Population Counts and Growth // Statistics Canada. – URL: http://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/as-sa/98-310-x/98-310-x2011001-eng.cfm (date of application: 25.11.2021).

8. Гренландия. Статистика. – Текст : электронный // TopGlobus. – URL: http://www.topglobus.ru/grenlandija-statistika-dannye-strana (дата обращения: 25.11.2021).

9. Образование коренных народов в Норвегии. Свейн Ланд. – Текст : электронный // Unesco. – URL: http://www.unesco.org/education/uie/pdf/Norway.pdf (дата обращения: 25.09.2021).

10. Статистика Финляндии. – URL: http://www.stat.fi/til/vrm.html (дата обращения: 25.11.2021).

11. Численность и состав населения. Федеральная служба государственной статистики. – URL: http://www.stat.fi/til/vrm.html (дата обращения: 25.11.2021).

12. Правовые основы обеспечения прав коренных народов Канады и России : учебное пособие / под редакцией А. Ф. Малого, С. В. Бухмина. – Казань : Издательство Казанского университета, 2019. – 160 с. – Текст : непосредственный.

13. Арктические и Северные территории Канады. – Текст : электронный // Arctic Council. – URL: https://arctic-council.org/ru/about/states/canada/ (дата обращения: 25.11.2021).

14. Crown-Indigenous Relations and Northern Affairs Canada // Government of Canada. – URL: https://www.canada.ca/en/crown-indigenous-relations-northern-affairs.html (date of application: 25.11.2021).

15. Budget 2020: Arctic and Northern Summary // Government of Canada. – URL: https://www.rcaanccirnac.gc.ca/eng/1562853124135/1562853167783 (date of application: 25.11.2021).

16. Territorial Formula Financing // Government of Canada. – URL: https://www.canada.ca/en/department-finance/programs/federal-transfers/territorial-formula-financing.html (date of application: 25.11.2021).

17. Сахаров, А. Г. Устойчивое развитие арктических территорий Канады: цели и результаты / А. Г. Сахаров, И. В. Андронова. – Текст : непосредственный // Вестник международных организаций. – 2020. – Т. 15, № 4. – С. 140–162.

18. Норвегия и Арктический регион. – Текст : электронный // Arctic Council. – URL: https://arctic-council.org/ru/about/states/norway/ (дата обращения: 25.11.2021).

19. Мороз, Е. Н. Реализация прав коренных народов на примере политики Норвегии в отношении саамского населения / Е. Н. Мороз. – Текст : непосредственный // Политика и Общество. – 2021. – № 1. – С. 41–49.

20. Sametingets budsjett 2020. Vedtatt 5. desember 2019. Sak 52/19 // Sámediggi: Sametinget. – URL: https://sametinget.no/_f/p1/i30a40103-03ca-41ba-bcfb-fd3cdc9dc306/sametingets-budsjett-2020-norsk-1.pdf (date of application: 25.11.2021).

21. О государственной программе Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Устойчивое развитие коренных малочисленных народов Севера» : постановление Правительства Ханты-Мансийского автономного округа – Югры от 5 октября 2018 года № 350-п. – Текст : электронный // Электронный фонда правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/550199962 (дата обращения: 25.11.2021).

22. Отчет Губернатора Ханты-Мансийского автономного округа – Югры о результатах деятельности Правительства Ханты-Мансийского автономного округа – Югры за 2020 год. – Текст : электронный // Стратегия24. – URL: https://storage.strategy24.ru/files/news/202011/703f4c73a2ef3178c0ad0294449b6e70.pdf (дата обращения: 25.11.2021).

23. Отчет по реализации Стратегии социально-экономического района Ханты-Мансийского района до 2030 года. Текст : электронный // Ханты-Мансийский район, официальный сайт администрации. – URL: http://hmrn.ru/raion/ekonomika/ser/strategy/otchet-2030-vizual.php (дата обращения: 25.11.2021).

24. Меры государственной поддержки коренных малочисленных народов Севера согласно Постановлению Правительства Ханты-Мансийского автономного округа – Югры от 05.10.2018 № 350-п «О государственной программе Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Устойчивое развитие коренных малочисленных народов Севера». – Текст : электронный // Официальный сайт октябрьского района ХМАО-Югры. – URL: http://oktregion.ru/upload/docs/ekonomika-i-finansy/razvitie-korennykh-malochislennykh-narodov-severa/Mery_gos_poddergki_KMNS-1.pdf (дата обращения: 25.11.2021).

УГОЛОВНОЕ ПРАВО И КРИМИНОЛОГИЯ. УГОЛОВНО-ИСПОЛНИТЕЛЬНОЕ ПРАВО

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 г. Выпуск 1 (64). С. 169–177

УДК 343.8
DOI: 10.18822/byusu202201169-177

К ВОПРОСУ ОБ ОБСТОЯТЕЛЬСТВАХ, СНИЖАЮЩИХ И ПОВЫШАЮЩИХ ОБЩЕСТВЕННУЮ ВРЕДНОСТЬ ЗЛОСТНОГО НАРУШЕНИЯ РЕЖИМА ОТБЫВАНИЯ НАКАЗАНИЯ И ЛИЧНОСТИ ОСУЖДЕННОГО

Головастова Юлия Александровна
доктор юридических наук, доцент,
профессор кафедры уголовно-исполнительного права
юридического факультета
ФГБУ ВО «Академия права и управления ФСИН России»
Рязань, Россия
E-mail: ugolovastova@yandex.ru

Гордополов Андрей Николаевич
адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров
ФГБУ ВО «Академия права и управления ФСИН России»
Рязань, Россия
E-mail: andrei.gordopolov@yandex.ru

Предметом исследования выступают обстоятельства, которые необходимо учитывать при привлечении к юридической ответственности осужденных, совершивших злостное нарушение установленного порядка отбывания наказания в виде лишения свободы. Цель исследования заключается в совершенствовании уголовно-исполнительного законодательства за счет нормативного закрепления в Уголовно-исполнительном кодексе РФ смягчающих и отягчающих обстоятельств, влияющих на определение им меры специального взыскания, что позволит содержательно расширить и уточнить институт дисциплинарного производства осужденных к лишению свободы. Методологическую основу исследования составляют сравнительно-правовой, формально-юридический и статистический методы. В частности, приводятся результаты проведенного опроса 469 сотрудников ФСИН России и 273 осужденных, являющихся злостными нарушителями установленного порядка отбывания наказания, на основе которых дается комплексная оценка обстоятельствам, оказывающим влияние на меру взыскания осужденным. Авторами обосновывается вывод о необходимости учета рассмотренных фактических условий, характеризующих совершение злостного проступка и саму личность осужденного. На основе проведенного исследования авторами обосновывается целесообразность нормативного закрепления в действующем Уголовно-исполнительном кодексе РФ обстоятельств, смягчающих и отягчающих меру взыскания осужденным, для повышения эффективности действия норм уголовно-исполнительного права, регламентирующих вопросы привлечения осужденных к пенитенциарной ответственности в местах лишения свободы.

Ключевые слова: злостные нарушители установленного порядка отбывания наказания, дисциплинарная ответственность осужденных, осужденный, лишение свободы, смягчающие обстоятельства, отягчающие обстоятельства, злостные нарушения.

ON THE QUESTION OF THE CIRCUMSTANCES THAT REDUCE AND INCREASE THE SOCIAL HARMFULNESS OF A MALICIOUS VIOLATION OF THE REGIME OF SERVING A SENTENCE AND THE PERSONALITY OF THE CONVICTED PERSON

Yulia A. Golovastova
Doctor of Law, Associate Professor,
Professor of the Department of Penal Enforcement Law
of the Faculty of Law
Academy of Law and Management
of the Federal Penitentiary Service of Russia
Ryazan, Russia
E-mail: ugolovastova@yandex.ru

Andrey N. Gordopolov
Adjunct of the Faculty of Training
of Scientific and Pedagogical Personnel
Academy of Law and Management
of the Federal Penitentiary Service of Russia
Ryazan, Russia
E-mail: andrei.gordopolov@yandex.ru

The subject of the study is the circumstances that must be taken into account when bringing to legal responsibility convicts who have committed a malicious violation of the established procedure for serving a sentence of imprisonment. The purpose of the study is to improve the penal enforcement legislation through the normative consolidation in the Penal Code of the Russian Federation of mitigating and aggravating circumstances affecting the determination of the measure of special punishment, which will significantly expand and clarify the institution of disciplinary proceedings of persons sentenced to imprisonment. The methodological basis of the study consists of comparative legal, formal legal and statistical methods. In particular, the results of a survey conducted by 469 employees of the Federal Penitentiary Service of Russia and 273 convicts who are malicious violators of the established order of serving a sentence are presented, on the basis of which a comprehensive assessment of the circumstances affecting the measure of punishment for convicts is given. The authors substantiate the conclusion that it is necessary to take into account the considered factual conditions characterizing the commission of a malicious offense and the very personality of the convicted person. On the basis of the conducted research, the authors substantiate the expediency of normative consolidation in the current Penal Enforcement Code of the Russian Federation of circumstances mitigating and aggravating the measure of punishment by convicts, in order to increase the effectiveness of the norms of penal enforcement law regulating the issues of bringing convicts to penitentiary responsibility in places of deprivation of liberty.

Keywords: malicious violators of the established order of serving a sentence, disciplinary responsibility of convicts, convicted, imprisonment, mitigating circumstances, aggravating circumstances, malicious violations.

Введение

С точки зрения реального воздействия норм уголовно-исполнительного права на общественные отношения в местах лишения свободы пенитенциарная ответственность выражается в применении к осужденному, совершившему злостные нарушения режима отбывания наказания, предусмотренных мер специального воздействия в виде взысканий, ограничивающих специальный правовой статус этого лица. В то же время Конституционный Суд Рос-

сийской Федерации не относит к мерам взыскания процедуру признания лица злостным нарушителем установленного порядка отбывания наказания, а причисляет ее к правовым последствиям назначения взыскания за совершение осужденным злостного проступка [6]. Стоит признать, что при сущностном различии данных процессов они являются мерами пенитенциарной ответственности, которые основываются прежде всего на общих принципах уголовно-исполнительного права [2, с. 308].

В настоящее время порядок наложения взысканий в отношении злостного нарушителя режима отбывания наказания осуществляется в соответствии со ст. 117 УИК РФ. Данная статья содержит неполный набор норм уголовно-исполнительного права, регулирующих процесс привлечения осужденных к лишению свободы к ответственности за нарушение режима отбывания наказания. Так, при назначении специальных взысканий злостному нарушителю режима отбывания наказания должны учитываться различные обстоятельства, позволяющие избрать ту санкцию, которая позволила бы исправить осужденного к лишению свободы, предупредить совершение им повторных злостных деяний.

Цель работы заключается в выявлении пробелов и недостатков уголовно-исполнительного законодательства, снижающих эффективность привлечения злостных нарушителей режима к ответственности за содеянное, а также в содержательном расширении и уточнении института дисциплинарного производства осужденных к лишению свободы. Задачи исследования: оценка действующего уголовно-исполнительного законодательства; изучение смягчающих и отягчающих обстоятельств, учитываемых при назначении взысканий злостным нарушителям режима; разработка предложений по совершенствованию УИК Российской Федерации.

Результаты и обсуждение

Необходимо отметить, что при назначении взыскания необходимо учитывать злостный характер совершенного деяния, степень вины осужденного, личность самого осужденного (пол, возраст, состояние здоровья и другие характеристики), а также обстоятельства, смягчающие и отягчающие пенитенциарную ответственность. Представляется, что последние обстоятельства необходимы для правильного выбора вида взыскания.

Совершение осужденным злостных проступков является умышленным актом, предполагающим под собой полный отчет лица о своих действиях, а также возможных последствиях совершенных деяний. В ходе процедуры проверки обстоятельств совершенного деяния необходимо определить, обладает ли оно признаком злостности или нет. После чего выявляется причастность осужденного, наступившие последствия данного проступка, а также его смягчающие и отягчающие обстоятельства.

Степень общественной вредности (грубости) злостного нарушения определяется в зависимости от наличия смягчающих и отягчающих обстоятельств, при которых проступок был совершен. Под привилегированными обстоятельствами в уголовно-исполнительном праве мы понимаем обстоятельства, позволяющие администрации ИУ применить менее суровые меры взыскания. Среди них можно выделить: совершение злостного проступка впервые или в силу стечения тяжелых жизненных обстоятельств, наличие у осужденного поощрений, несовершеннолетие лица, совершение проступка по мотиву сострадания вследствие принуждения других лиц, где виновный сохранял возможность руководить своими действиями, хотя совершал деяние под влиянием этих обстоятельств, чистосердечное признание, беременность и наличие малолетних детей и др.

Впервые совершившим деяние будет считаться осужденный, совершивший одно или несколько злостных пенитенциарных проступков, ни за один из которых он не повергался взысканию на основании постановления начальника ИУ. Указанное условие будет присутствовать в действиях лица, когда оно фактически совершило злостное нарушение во второй раз, в то время как истек срок давности привлечения к ответственности за ранее совершенное деяние или он был досрочно освобожден от взыскания. В этом случае считается, что новый злостный проступок совершается впервые, и должностное лицо ИУ вправе признать такое

обстоятельство смягчающим. В ходе опроса практических работников ФСИН России 14,3 % респондентов считают уместным учитывать данное обстоятельство в качестве смягчающего в ходе процедуры привлечения злостного нарушителя к ответственности (табл. 1).

Совершение злостного проступка впервые не во всех случаях может рассматриваться как смягчающее обстоятельство. Отсутствие у осужденного действующих взысканий не должно восприниматься как его личное достижение, так как правопослушное поведение является неотъемлемым фактом процесса исправления, вследствие чего целесообразно рассматривать данное обстоятельство в качестве смягчающего исключительно в отношении несовершеннолетних нарушителей. В процессе формирования личности несовершеннолетнего осужденного он наиболее подвержен как негативному, так и позитивному влиянию, а также более склонен к усвоению процессов исправления. Таким образом, факт несовершеннолетия лица необходимо рассматривать как смягчающее обстоятельство при допущении злостных пенитенциарных проступков. В отношении данной категории лиц предпочтение должно отдаваться воспитательным мероприятиям, в противовес карательным.

Среди обстоятельств, смягчающих меру взыскания, также можно упомянуть стечение тяжелых жизненных обстоятельств либо мотив сострадания, такие как: тяжелое физическое состояние, наличие серьезного заболевания, тяжелая неизлечимая болезнь, смерть близкого родственника и другие. При анкетировании сотрудников ФСИН России на данный факт в качестве смягчающего обстоятельства указали 17,6 % респондентов.

Таблица 1 – Результаты опроса сотрудников ФСИН России об обстоятельствах, которые могут расцениваться как смягчающие ответственность осужденного

Вопросы	**Ответы**	**Результаты**	
		Всего, чел.	**%**
Смягчающими обстоятельствами при признании осужденного злостным нарушителем режима отбывания, а также наложении на него дисциплинарного взыскания могут быть:	1. Стечение жизненных обстоятельств (смерть близкого родственника, заболевание тяжелой болезнью осужденным и др.)	83	17,6
	2. Совершение злостного нарушения впервые	67	14,3
	3. Беременность осужденной или наличие малолетних детей	108	23
	4. Личное признание осужденного в совершении злостного нарушения	84	17,9
	5. Возмещение нанесенного ущерба	66	14,1
	6. Совершение злостного проступка в процессе отстаивания нарушенного права осужденного	29	6,1
	7. Все вышеперечисленное	19	4
	8. Другое	13	3

Возникновение вышеперечисленных обстоятельств обусловлено нестабильным эмоциональным состоянием осужденного, апатией, побуждающей агрессию. В такие моменты лицо может допускать употребление спиртных и наркотических средств и психотропных веществ, проявление угрозы, неповиновение представителям администрации и их оскорбление, при отсутствии признаков преступления, и другие нарушения. Придерживаясь принципа гуманизма, данные обстоятельства в зависимости от ситуации целесообразно расценивать как смягчающие.

Аналогично смягчающим обстоятельствам при привлечении осужденного к ответственности за злостное нарушение может выступать чистосердечное признание в его совершении. Данный факт будет учтен, если осужденный в устном или письменном виде добровольно сообщил о совершении правонарушения до установления его виновности администрацией исправительного учреждения. Учету подлежат также случаи признания осужденного в деянии до их выявления сотрудниками администрации. При их опросе 17,9 % указали на данное обстоятельство (табл. 1).

Чистосердечное признание осужденного может быть выражено в активном добровольном содействии сотрудниками администрации при проведении проверки по факту противоправного деяния: предоставление неизвестной информации, администрации ИУ: изобличение соучастников, раскрытие каналов поступления запрещенных предметов, их тайников и другое. Подобные признания лица после установления его вины в злостном нарушении также рассматриваются в качестве смягчающего обстоятельства, однако такое действие будет носить меньший эффект, так как обусловлено длительным сокрытием от сотрудников администрации данного факта, усложняя процесс выявления. Безвыходная ситуация вынуждает осужденного признаться в содеянном, рассчитывая на смягчение.

Смягчающими обстоятельствами могут быть деяния, выражающиеся в заглаживании морального и материального вреда после совершения злостного нарушения. К ним можно отнести: возмещение вреда после мелкого хулиганства (восстановление битых стекол окон, замена испорченных дверей за счет нарушителя); возмещение морального вреда при угрозе, неповиновении представителям администрации исправительного учреждения или их оскорблении при отсутствии признаков преступления (приношение публичных, письменных или устных извинений перед сотрудником) и другое. Вышеуказанные действия осужденного могут свидетельствовать о его раскаянии. В ходе опроса 14,1 % сотрудников ФСИН России выступили за существование данного смягчающего обстоятельства. Некоторые из них также указали среди смягчающих оснований совершение злостного проступка в процессе отстаивания нарушенного права осужденного – 6,1 % (табл. 1).

В ходе опроса злостных нарушителей среди причин противоправных проступков выделяют такие, как низкая материальная обеспеченность мест лишения свободы – 10 %, несправедливость применения мер ответственности – 21,6 %; несоблюдение прав осужденных – 15,6 %; превышение должностных полномочий – 8,8 % (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты опроса осужденных, являющихся злостными нарушителями режима отбывания наказания, о причинах противоправного поведения

Вопросы	**Ответы**	**Результаты**	
		Всего, чел.	**%**
По какой причине вы злостно нарушили режим отбывания наказания?	1. Низкая материальная обеспеченность	27	10
	2. Несправедливость применяемых мер дисциплинарного взыскания	59	21,6
	3. Несоблюдение прав осужденных	43	15,6
	4. Превышение должностных полномочий сотрудниками администрации	24	8,8
	5. Нежелание соблюдать правила внутреннего распорядка	99	36,2
	6. Все вышеперечисленное	12	4,4
	7. Другое	9	3,4

Стоит отметить, что неудовлетворительное материальное обеспечение мест лишения свободы может приводить к нарушению качества условий содержания осужденных. Данные факты обусловливают возникновение ситуаций отстаивания осужденными своих прав. Поэтому совершение злостных проступков при наличии указанного обстоятельства будет являться смягчающим.

Учитывая специфическое правовое положение осужденных женщин, стоит рассмотреть беременность и наличие малолетних детей. Некоторые ученые убеждены, что применение мер взыскания может представлять угрозу для здоровья как матери, имеющей малолетних детей, а также для беременной [1, с. 278]. Так, содержание данной категории осужденных в запираемых помещениях противоречит пр. 22 Бангкокских правил, пр. 45 Правил Нельсона Манделы. В международных актах предусматривается привлечение рассматриваемой категории лиц к ответственности в случае отсутствия целей причинения физических страданий и

унижения человеческого достоинства, учитывая не только интересы, но и малолетних детей, даже если они еще не появились на свет [5, с. 78].

В соответствии с принципом гуманизма данное основание может рассматриваться в отношении осужденных женщин, совершивших злостные проступки. При беременности необходимо учитывать функциональные изменения организма женщины и их воздействие на психику. Наличие у злостной нарушительницы малолетних детей предполагает особенность правового положения таких осужденных, в частности при применении к ним мер взыскания. Это обусловливает повышение ответственности осужденной не только в отношении себя, но и за своих малолетних детей [9, с. 126]. Другие ученые полагают, что подобные послабления к беременным и имеющим малолетних детей женщинам негативно сказываются на воспитательной работе [3, с. 20–21]. В противовес данной позиции мы убеждены, что подобное применение мер взыскания может негативно отразиться на малолетнем ребенке, который полностью зависит от осужденной матери.

В ходе опроса сотрудников ФСИН России 23 % респондентов солидарны с тем, что беременность и наличие у осужденных женского пола малолетних детей является смягчающим обстоятельством при применении мер пенитенциарной ответственности (табл. 1). Исходя из вышесказанного, водворение в ШИЗО/ДИЗО либо перевод в ПКТ должны применяться лишь в исключительных случаях при создании ситуации существенного посягательства на нормальную деятельность исправительного учреждения. Ограничение на применение в отношении данной категории осужденных водворения в ШИЗО, ПКТ исключает основания признания злостной нарушительницей [8, с. 101].

Наличие смягчающих обстоятельств предусматривает под собой совокупность фактических данных, находящихся за пределами состава злостного проступка, уменьшающих вредность злостного деяния осужденного и его личности, подлежащих учету начальником ИУ при определении меры взыскания. Наравне с этим в практической деятельности встречаются ситуации, при которых осужденные могут совершать злостные нарушения с особым ярко выраженным характером, ввиду чего необходимо выделить юридические факты, которые учитываются при наложении взыскания.

К отягчающим обстоятельствам совершения злостных пенитенциарных проступков можно отнести отказ осужденного от предоставления объяснений в грубой форме [7, с. 67]. Данное обстоятельство в основном негативно воспринимается сотрудниками администрации ввиду того, что создаются препятствия для нормализованного расследования данных происшествий [4, с. 37].

В ходе проведенного опроса практических работников ФСИН России было установлено, что среди отягчающих обстоятельств можно выделить активную роль в совершении злостного проступка – 14,5 %; систематическое или длительное совершение злостных проступков в течение года – 11,2 %; совершение злостного нарушения по нетерпимости к определенным группам осужденных по политическим, религиозным, криминальным, расовым и другим мотивам – 12,2 %; наступление вредных последствий после совершения злостного проступка – 11,2 %, совершение нарушения в состоянии алкогольного или наркотического опьянения – 11,2 %, совершение злостного проступка группой осужденных – 11,2 %; умышленное сокрытие следов злостного нарушения – 10,5 %; месть другому осужденному – 9,2 %, совершение злостного проступка при чрезвычайных обстоятельствах – 8,4 % (табл. 3).

Таблица 3 – Результаты опроса сотрудников ФСИН России об обстоятельствах, которые могут расцениваться как отягчающие ответственность осужденного

Вопросы	**Ответы**	**Результаты**	
		Всего, чел.	**%**
Отягчающими обстоятельствами при признании осужденного злостным нарушителем режима отбывания, а также наложении на него дисциплинарного взыскания могут быть	1. Активная роль в совершенном злостном нарушении	68	14,5
	2. Совершение злостного нарушения по нетерпимости к определенным группам осужденных по политическим, религиозным, криминальным, расовым и другим мотивам	57	12,2
	3. Систематическое или совершение длящихся злостных нарушений в течение года	53	11,2
	4. Наступление вредных последствий после совершения злостного нарушения	53	11,2
	5. Совершение злостного нарушения в состоянии алкогольного или наркотического опьянения	53	11,2
	6. Совершение злостного нарушения группой осужденных	53	11,2
	7. Умышленное сокрытие следов злостного нарушения	49	10,5
	8. Месть другому осужденному	43	9,2
	9. Совершение злостного нарушения при чрезвычайных обстоятельствах	39	8,4
	10. Другое	1	0,4

Совершение злостного нарушения по причине нетерпимости к определенным группам осужденных по политическим, религиозным, криминальным, расовым и другим мотивам является наиболее грубым нарушением. Учитывая многонациональный и многоконфессиональный состав осужденных в местах лишения свободы, стоит акцентировать внимание на предупреждении противоправных проступков данного направления, так как при более тяжком проявлении они могут носить признаки общественной опасности.

Под длительным совершением злостного нарушения необходимо понимать грубое действие (бездействие), выражающееся в длительном непрекращающемся невыполнении или ненадлежащем выполнении возложенных на осужденного обязанностей и характеризующееся непрерывным осуществлением противоправного деяния, запрещенного УИК РФ. В то же время можно предположить существование продолжаемых злостных нарушений, выраженных в единых грубых злостных нарушениях установленного порядка отбывания наказания, совершенное осужденным, состоящее из ряда тождественных по направленности и содержанию действий (бездействия).

В то же время систематическое совершение злостного нарушения подразумевает под собой однородное грубое злостное нарушение установленного порядка отбывания наказания, совершенное одним и тем же осужденным более двух раз в течение года после признания его злостным нарушителем.

Под наступлением вредных последствий после совершения злостного проступка следует полагать возникновение ситуаций, негативно влияющих на обстановку в исправительном учреждении. Нахождение лица в алкогольном состоянии, в зависимости от ситуации, может нести в себе неадекватность осужденного, который при должной мотивации может совершать злостные нарушения, а возможно, и преступления.

Рассматривая групповое совершение злостных нарушений, необходимо понимать функционирование группировок осужденных отрицательной направленности, включающих в себя двух и более лиц, деятельность которых направлена на совершение противоправных действий. Умышленное сокрытие следов злостного нарушения предполагает под собой отказ от

дачи объяснений по факту совершения противоправного деяния либо умышленное введение в заблуждение сотрудников, осуществляющих проверку по факту совершения нарушения. Совершение проступка из мести носит прежде всего личный характер и может проявляться в периодическом совершении проступков. Их предупреждение необходимо осуществлять совместно с воспитательными и психологическими службами учреждения.

Под совершением злостного проступка при чрезвычайных обстоятельствах понимается противоправное деяние лица в момент стихийных бедствий, техногенных катастроф, во время военных действий близ исправительного учреждения либо при объявлении режима чрезвычайного положения в местах лишения свободы. Данное направление наиболее опасно, так как включает в себя ситуации, которые могут побудить массовые проявления противоправных деяний.

Ряд отягчающих обстоятельств присутствует в уголовном законодательстве. Так, активная роль осужденного в совершении злостного проступка заведомо может пересекаться с совершением преступления криминальной группой лиц, тем самым отвлекая внимание от последнего. В данном случае девиантное поведение может выражаться как в организаторской деятельности, так и в эксцессе исполнителя. Еще одним видом групповой активности является принуждение на совершение злостных проступков осужденного, страдающего психическими расстройствами, не исключающими вменяемости.

Таким образом, под отягчающими обстоятельствами назначения взыскания осужденному следует понимать перечень фактических данных, находящихся за пределами состава злостного проступка, повышающих вредность злостного деяния осужденного и его личности, подлежащих учету начальником ИУ при определении меры взыскания.

Заключение и выводы

Подводя итог, хочется подчеркнуть, что в современном уголовно-исполнительном праве законодателем закреплен порядок привлечения осужденных, совершивших злостные нарушения к пенитенциарной ответственности. Данное направление в основном полагается на субъективное усмотрение начальника исправительного учреждения, основанное на коллегиальном мнении комиссии, состоящей из руководителей подразделений исправительного учреждения или лиц, их замещающих. В результате данной правоприменительной практики создается почва для субъективного принятия решений в отношении неугодной категории осужденных, что свидетельствует о нарушении принципа законности. Частичным решением возникшей ситуации видится законодательное закрепление в нормах уголовно-исполнительного права смягчающих и отягчающих обстоятельств, которые позволят более детально и структурированно подходить к процессу привлечения злостного нарушителя к пенитенциарной ответственности.

Список литературы

1. Белова, Н. А. Исполнение наказаний в России в отношении женщин: история и современность : монография / Н. А. Белова. – Вологда : ВИПЭ ФСИН России, 2015. – 339 с. – Текст : непосредственный.

2. Головастова, Ю. А. Система уголовно-исполнительного права как отрасли российского права / Ю. А. Головастова. – Текст : непосредственный // Евразийский юридический журнал. – 2019. – № 2 (129). – С. 307–312.

3. Исаев, Л. Н. Некоторые проблемы применения уголовно-исполнительного законодательства, регулирующего порядок отбывания наказаний в виде лишения свободы осужденными женщинами / Л. Н. Исаев. – Текст : непосредственный // Вестник Владимирского юридического института. – 2007. – № 2 (3). – С. 17–21.

4. Дисциплинарная ответственность осуждённых, отбывающих наказание в исправительных учреждениях РФ / составители С. В. Исаев, Г. В. Ситников ; под общей редакцией С. В. Исаева. – Пермь, 2015. – 68 с. – Текст : непосредственный.

5. Онищенко, И. С. Исполнение наказания в виде лишения свободы в отношении женщин, имеющих малолетних детей : диссертация на соискание ученой степени кандидата юридических наук : 12.00.08 / И. С. Онищенко. – Рязань, 2019. – 260 с. – Текст : непосредственный.

6. Об отказе в принятии к рассмотрению жалобы гражданина Романюка Михаила Юрьевича на нарушение его конституционных прав положениями статьи 78 УИК РФ : определение Конституционного Суда РФ от 27.02.2018 № 326-О. – Текст : электронный // Законы, кодексы и нормативно-правовые акты Российской Федерации. – URL: https://legalacts.ru/sud/opredelenie-konstitutsionnogo-suda-rf-ot-27022018-n-326-o/ (дата обращения: 24.09.2021).

7. Сибиль, Ю. П. О применении мер взыскания к осужденным, отбывающим наказание в исправительных учреждениях уголовно-исполнительной системы / Ю. П. Сибиль. – Текст : непосредственный // Ведомости уголовно-исполнительной системы. – 2018. – № 9. – С. 65–70.

8. Ткачевский, Ю. М. Российская прогрессивная система исполнения уголовных наказаний / Ю. М. Ткачевский. – Москва : Городец, 2007. – 240 с. – Текст : непосредственный.

9. Шляпникова, О. В. Пробелы в правовом регулировании отбывания наказания осужденными беременными женщинами и женщинами, имеющими малолетних детей, в исправительных учреждениях на территории Российской Федерации / О. В. Шляпникова, Н. А. Сидорова. – Текст : непосредственный // Вестник Саратовской государственной юридической академии. – 2016. – № 5 (112). – С. 126–130.

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 г. Выпуск 1 (64). С. 178–189

УДК 343
DOI: 10.18822/byusu202201178-189

ПЕНАЛИЗАЦИЯ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ПРЕСТУПЛЕНИЙ

Козаченко Иван Яковлевич
доктор юридических наук, профессор,
заведующий кафедрой уголовного права,
ФГБОУ ВО «Уральский государственный юридический университет»,
Екатеринбург, Россия,
E-mail: uglaw@yandex.ru
ORCID ID 0000-0002-4870-8425

Сергеев Данил Назипович
кандидат юридических наук,
доцент кафедры уголовного права,
ФГБОУ ВО «Уральский государственный юридический университет»,
Екатеринбург, Россия,
E-mail: dnse@mail.ru
ORCID ID 0000-0002-5641-7812

В статье сделана попытка комплексного исследования содержания структурной и функциональной природы уголовных санкций в теоретическом моделировании ответственности за генетические преступления. Авторы анализируют факторы, обусловливающие уголовно-правовые санкции за эти преступления, а равно их значение для законодательной и правоприменительной практики.

В статье формулируется научно обоснованное определение понятия уголовных санкций, раскрывается их логико-цифровая взаимосвязь и взаимообусловленность, ориентированные на преступления генетического характера. Раскрывается вопрос создания механизма влияния уголовных санкций на квалификацию преступлений в генно-технологической отрасли.

В статье высказываются рекомендации по совершенствованию системы уголовных санкций за преступления в названной сфере. Это положение обусловлено тем, что одним из важнейших элементов политики права считается уголовная политика, которая определяет общие принципы, основные направления и дальнейшие перспективы уголовно-правовой охраны наиболее ценных общественных отношений от преступных посягательств. Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта № 18-29-14028 «Проект криминализации деяний в сфере исследования генома человека и других организмов».

Ключевые слова: пенализация, криминализация, генетические преступления: генно-технологические преступления.

PENALIZATION OF GENETIC CRIMES

Ivan Y. Kozachenko
Doctor of Law Sciences, Professor,
Head of the Criminal Law Department,
Ural State Law University,
Yekaterinburg, Russia
E-mail: uglaw@yandex.ru
ORCID ID 0000-0002-4870-8425

Danil N. Sergeev
Candidate of Law Sciences, Assistant professor,
Criminal Law Department,
Ural State Law University,
Yekaterinburg, Russia
E-mail: dnse@mail.ru
ORCID ID 0000-0002-5641-7812

This article contains a comprehensive study of the content of structural and functional nature of criminal sanctions in the theoretical modeling of responsibility for genetic crimes. The authors analyze the factors which underpin the criminal law sanctions for these crimes, as well as their importance for the legislative and law enforcement practice.

The article formulates scientifically grounded definition of criminal sanctions and reveals their logical connection and interdependence focused on the crimes of genetic nature. The article covers the creation of a impact mechanism of criminal sanctions on the qualification of crimes in the genetic engineering industry.

The article provides recommendations for improvement of the criminal sanctions system in this sphere. This position is determined by the fact that one of the most important elements of law policy is penal policy, which defined the general principles, main directions and further perspectives of criminal law protection of the most valuable social relations from criminal invasions. The research was funded by the Russian Foundation for Basic Research (grant project No. 18-29-14028 "The Project of Criminalizing Actions in Human Genome and Other Organism Research").

Keywords: penalization; criminalization; genetic crimes: genetic engineering crimes.

Введение

Сочетание «генетические преступления» еще несколько лет назад звучало очень футуристично. Между тем сегодня это уже реальность современного общества, которая нашла выражение и в букве уголовного закона отдельных государств. Так, 11-я поправка к Уголовному кодексу КНР от 26 декабря 2020 г. криминализовала два новых деяния: ст. 334-1 «Незаконный сбор генетических ресурсов человека или контрабанда генетических ресурсов человека» и ст. 336-1 «Незаконная имплантация генно-модифицированных, клонированных человеческих эмбрионов» [7].

Вслед за принятием поправки в китайской уголовно-правовой науке появилось понятие «генно-технологические преступления» [9; 10], куда отнесены приведенные составы преступлений. В российском уголовном законодательстве подобных норм еще нет, но вследствие скорости развития биотехнологий и интенсификации междисциплинарных исследований на стыке права и генетики появились вполне конкретные предложения по криминализации отдельных деяний в этой области [3; 8]. Свой проект предложили и авторы настоящей статьи [1, с. 187–188].

Решение о криминализации тех или иных новых преступлений не может идти в отрыве от процесса пенализации. Несмотря на то, что пенализацию принято отрывать от криминализации, называть самостоятельным процессом, очевидно, что она является зависимым от криминализации процессом, частью целого. При этом большинство авторитетных исследователей подчеркивают, что пенализация фактически образует количественную сторону криминализации. При этом, например, А. И. Коробеев аргументирует самостоятельность пенализации ее выходом за пределы законодательной деятельности, вводя в ее объем также фактическую наказуемость в судебной практике [2, с. 138]. Однако здесь на деле идет речь о вторичной пенализации, т. е. о реализации наказания; точно так же, как мы можем вести речь о вторичной криминализации в разрезе применения той или иной уголовно-правовой нормы об ответственности.

Без криминализации пенализация невозможна, но и без пенализации не создается преступление (отпадает признак наказуемости). Например, А. В. Наумов под криминализацией понимает законодательное признание определенных деяний преступными и наказуемыми, т. е. установление за их совершение уголовной ответственности [5, с. 317]. Например, в некоторых международных актах приводится перечень преступлений, однако наказание за них не устанавливается (этот вопрос отдается на откуп национальному законодателю). Можно ли назвать такое деяние криминализированным без обретения уголовно-правовой плоти (в том числе санкции)? Конечно же нет. Лишь после первичной криминализации, сопровождаемой пенализацией, эти процессы могут развиваться относительно самостоятельно: могут независимо друг от друга измениться границы преступного, увеличиться или уменьшиться санкции.

По этой причине вопросы пенализации нельзя упускать из вида при подготовке проектов любой новой криминализации. Между тем процесс пенализации чрезвычайно сложен, поскольку он направлен на достижение нескольких целей: юридико-технической (влияет на категоризацию преступлений), прогностической.

Методы

С позиции общей теории уголовное право рассматривается как сложное, многогранное социальное явление, тесно связанное, с одной стороны, с экономикой, политикой, общественными отношениями, образом жизни, моралью и т. д., с другой – с иными отраслями права. При этом в первом случае уголовное право проявляет себя как субординационно подчиненная категория, во втором – как координационно-однозначная. Сложность и многогранность уголовного права предполагает наличие различных методов его изучения: исторического, социологического, аксиологического, логического, метода сравнительного правоведения и т. д., каждый из которых, не заменяя друг друга, позволяет определить сущность, функции, задачи и цели уголовного права на современном этапе развития человека, общества и государства.

Однако с учетом специфики аспекта анализируемой в статье проблемы и кругом рассматриваемых в ее параметрах вопросов представляется целесообразным в качестве основных избрать методы системно-структурного и функционального анализа.

Поскольку сама категория «генетические преступления» в законодательстве не существует, а является лишь результатом теоретического моделирования, то само построение санкций за такие деяния также основывается на методе теоретического моделирования.

Место и роль санкций в уголовно-правовой системе

Системность уголовного права тесным образом связана с его структурой, так как структура вне системы немыслима, а любая система в своей основе структурна. Исходя из природы целостных свойств системы уголовного права, следует выделять внутреннюю и внешнюю ее структуру. Внутренняя (содержательная) структура включает в себя элементы и их отношения. Внешняя (структура формы выражения содержания) предполагает целостные свойства системы.

Система уголовного права, обладающая сложной структурой, способна сохранять свое качественное состояние лишь только потому, что ей присущи определенные функции, имеющие применительно к уголовному праву два основных значения. Во-первых, функции уголовного права указывают на ту социальную роль, которую оно выполняет по отношению к обществу. Подобное проявляет себя, например, в охране общественных отношений от преступных посягательств и т. д. Во-вторых, функции обозначают зависимость, которая имеет место между различными элементами системы уголовного права. Например, зависимость между уголовной ответственностью и ее основанием, санкцией и диспозицией, санкцией и нормой уголовного права и т. д.

Вместе с тем уголовное право выступает своеобразным социальным показателем ценности тех благ общества, для охраны которых оно предназначено.

Таким образом, если уголовная ответственность – субстанция, а уголовное наказание – мера этой субстанции, то уголовная диспозиция – это правовое выражение основания и пре-

делов уголовной ответственности. Что же касается уголовной санкции, то она выступает в роли специфической (причем основной) типовой меры уголовного наказания, и в силу этого появляется возможность проводить сравнительный анализ характера и степени общественной опасности различных преступлений, в том числе и генетического характера. В плане изложенного отмеченную связь между уголовной ответственностью, уголовным наказанием, уголовной диспозицией и уголовной санкцией следует рассматривать не только лишь в плоскостной, одномерной проекции, но и с точки зрения ее многоаспектного и многоуровневого характера.

Анализ уголовных санкций в конечном счете приводит к выводу о том, что они представляют собой динамическую систему, строго сбалансированную с другими равнозначными или более объемными уголовно-правовыми целостностями. И, как любое целостное системное образование, уголовные санкции обладают всеми свойствами и признаками этой системы и, кроме того, имеют свои постоянные и переменные параметры, позволяющие, с одной стороны, применять их в качестве эталона в отношении сходных по характеру и социально-правовой природе преступлений; с другой – в качестве необходимого правового инструментария для дифференциации ответственности и индивидуализации наказания в зависимости от особенностей личности виновного, характера и объема содержания совершенного им деяния.

Кроме того, классификация уголовных санкций выступает своеобразной и необходимой предпосылкой типологии преступлений в зависимости от характера и степени их общественной опасности. Это и предопределило основную цель теоретического анализа избранной для исследования проблемы, заключающейся в выборе оптимальных вариантов построения уголовно-правовых санкций, в выявлении механизма взаимообусловленности уголовных санкций с другими уголовно-правовыми образованиями, в выработке конкретных практических выводов и рекомендаций, направленных на повышение эффективности противодействия преступным посягательствам на личность, общество, государство.

Санкция служит наиболее простым и наглядным выражением государственного отношения к нежелательному, а тем более преступному поведению. Говоря об уголовно-правовой санкции, следует заметить, что она проявляет себя трояко. Прежде всего уголовная санкция выступает базовой правовой формой выражения уголовной ответственности. Кроме того, эта форма содержательна. Своим содержанием уголовная санкция выражает меру: вид и размер уголовного наказания, входящего в содержание уголовной ответственности. Эти два свойства указывают на функциональную роль уголовной санкции, выступающей своеобразным связующим звеном нового свойства уголовной ответственности, с одной стороны, и уголовного наказания – с другой, так как она выступает одновременно с указанной функцией и юридической конструкцией, с помощью которой законодатель закрепляет в уголовно-правовой норме соответствующую меру уголовного наказания.

Предписания нормы уголовного права, отражая реально существующие отношения, преломляются в сознании субъектов, вызывают обратную связь, заключающуюся в определенном поведении субъектов. Подавляющее число людей правильно воспринимают и признают эти предписания, добровольно подчиняя свои личные интересы интересам общественным и государственным. Вместе с тем имеют место случаи, когда для подчинения индивидом своего поведения требованиям закона необходимо принудительное влияние со стороны государства, общества или коллектива.

Будучи правовой формой выражения уголовной ответственности, уголовная санкция и ее законодательное оформление зависят от ряда факторов, основными среди которых следует назвать социальную значимость (ценность) блага, охраняемого соответствующей нормой уголовного права; политические моменты, влияющие на характер противодействия определенным видам преступлений (как и всей преступности в целом) уголовно-правовыми средствами; место, занимаемое конкретной санкцией (группой санкций) в системе других санкций; юридико-техническую ее конструкцию, а также структурно-содержательную особенность и той уголовно-правовой нормы, элементом которой она является. И только через эти факторы и посредст-

вом их уголовная санкция наполняется конкретным содержанием, что и позволяет ей проявлять свою специфическую сущность.

Границы уголовно-правового воздействия в сфере генетики

Границы уголовно-правового воздействия предопределены социальной важностью (значимостью, ценностью) тех или иных видов общественных отношений, которые берутся под охрану уголовным законом. Кроме того, они очерчены пределом регулирующих и охранительных возможностей уголовного права, что в свою очередь выступает важной гарантией, предотвращающей распространение сферы его действия на такие социальные явления, которые оно ни охранять, ни тем более регулировать не в состоянии. И, наконец, что является следствием первых двух положений, ограничение пределов уголовно-правового воздействия служит важной гарантией защиты прав и свобод человека.

Многие общественные отношения межличностного характера, находясь за пределами уголовно-правового воздействия, регулируются нормами других отраслей права или моральными нормами. Взгляд на наказание как на средство самозащиты общества против нарушений условий его существования позволяет заключить, что уголовное право регулирует и охраняет такие общественные отношения, существование, укрепление и развитие которых является в данный момент условием существования человека, общества и государства.

Среди всех социальных ценностей, охраняемых уголовным правом, центральное (особое) место занимает человек во всех его личностных проявлениях в любой из сфер общественной жизни людей. И в этом плане аксиомой является утверждение, что человек со всеми многообразными гранями своего социального бытия выступает в качестве уникального, бесценного в социальном смысле и невосполнимого в биологическом – в случае лишения его жизни – творения генной, общественной и природной сферы. Ибо любая живая система, к которой в первую очередь относится человек, обладает неповторимыми, одной ей присущими особенностями, касающимися и физиологических (телесных) и психологических его параметров. Томас Мор, например, видел в человеке высшую ценность. Он глубоко возмущался тем, что человек ценится «гораздо дешевле, чем само золото» [4, с. 68].

Особое (центральное) место личности в иерархии социальных ценностей обусловлено прежде всего тем, что личность является одним из участников общественных отношений, в том числе и тех, которые регулируются и охраняются уголовным правом. Кроме того, и это, пожалуй, главное, личность выступает единственным «творцом» этих общественных отношений.

Если для общества ценен человек, то для человека неоспорима ценность жизни и здоровья, и общество стремится к их охране и защите. Генетическое достоинство, биологическая безопасность личности – очевидно составляющие уголовно-правовой охраны личности. Однако генетические преступления посягают не только на личность, но и масштабируются в популяции, выходят за пределы традиционного понимания такого объекта уголовно-правовой охраны, как личность.

Факторы пенализации

В этой связи важен вопрос, чем же тогда объясняется несовпадающая оценка общественной опасности различных посягательств, в результате которых потерпевшим причиняется одинаковый по содержанию вред (скажем, смерть или причинение вреда здоровью одинаковой тяжести)? Чем руководствуется законодатель, устанавливая различную по содержанию ответственность и определяя различное по тяжести наказание за фактически одинаковый, например, физический вред человеку в результате совершения того или иного преступления?

Среди всех факторов пенализации, объясняющих и обосновывающих выбор того или иного уголовно-правового решения, бесспорно, основное, ведущее место занимает характер взаимосвязи охраняемого объекта со спецификой конкретных общественных отношений.

Именно это сочетание и дает представление об общественной значимости (социальной ценности) того или иного объекта, которому причиняется вред.

Независимо от многообразия форм построения уголовно-правовых норм, предусматривающих ответственность за разнообразные преступления, схожие по своему объекту с деяниями в генно-технологической области, модель принятия решения о пенализации воспроизводится практически всегда одинаково.

Во-первых, законодатель указывает на наказуемость деяния при наличии определенной формы вины. В этом случае основную свою идею он проводит через триаду понятий, например «умышленное... деяние... наказывается». Имеют место уголовно-правовые нормы с юридической конструкцией: «неосторожное... деяние... наказывается». Наиболее распространенными юридическими конструкциями являются нормы, в которых содержится указание на объективный признак: «деяние... наказывается». Важность дифференциации санкций в зависимости от формы вины очевидна и не нуждается в отдельных пояснениях.

Во-вторых, наказуемость деяния определяется не сама по себе, а лишь в сочетании с субъективными элементами. Поэтому ставится вопрос: кто подлежит ответственности и наказанию за совершение этого деяния? И только после этого определяется, какими свойствами должны обладать, с одной стороны, наказуемое деяние, с другой – лицо, его совершившее. Чтобы ответы на эти вопросы были не только полными, но и, что самое главное, объективно обоснованными, законодатель соответственно и использует ту или иную юридическую конструкцию уголовно-правовой нормы, тот или иной ее классификационный вид. Очевидно, что санкция за групповое преступление должна отличаться от индивидуального преступного акта, а санкция за преступление, совершенное специальным субъектом, – от санкции за деяние, совершенное общим.

Анализ специфики фиксирования в нормах уголовного права объективных и субъективных элементов, лежащих в основании уголовной ответственности, позволяет уяснить своеобразный прием законодателя. Суть его заключается в том, что, определяя наказуемость соответствующего деяния (объективный признак), законодатель непосредственно или опосредованно связывает наказуемость этого деяния со спецификой субъективного признака (социально-ценностной направленностью деятельности и психологическим отношением к этой деятельности субъекта преступного деяния). Иными словами, объективное и субъективное свойства, лежащие в основании уголовной ответственности и нашедшие закрепление в норме уголовного закона, неразрывны в своем единстве.

В-третьих, содержание и форма юридической конструкции уголовных санкций за преступления в генно-технологической сфере не могут не учитывать их место и роль в системе санкций, предусматривающих наказания за другие «родственные» виды преступлений. Социальная ценность генотипа человека может служить основным фактором, влияющим на выбор позиции, занимаемой этой группой преступлений в структуре Особенной части Уголовного кодекса, и достаточно суровых санкций за них.

В-четвертых, санкция должна соответствовать степени конкретности диспозиции преступления. Чем шире объем деяния, тем шире должны быть предлагаемые границы санкций, поскольку широта описания деяния предопределяет определенную широту судейского усмотрения при определении вида и размера наказания.

Модель построения санкций за генетические преступления

Как системное образование уголовные санкции за генетические преступления заключают в себе и статический, и динамический аспекты. Статический аспект уголовных санкций позволяет выявить их системно-структурные свойства, а динамический – их функциональное многообразие. Статические и динамические свойства уголовных санкций за генетические преступления, находясь в логической взаимосвязи, проявляют себя через содержание этих санкций, которое реализуется в рамках уголовных правоотношений регулятивного и охранительного характера.

Выступая в качестве социально-правовой реалии, уголовные санкции за генетические преступления должны отражать социально-ценностную иерархию уголовно-правовой охраны и объем тех мер, с помощью которых эта охрана должна осуществляться. Основное социальное значение названной функции рассматриваемых нами видов уголовных санкций заключается в том, что эта функция является конкретным воплощением актуальной уголовной политики государства.

Вся система уголовных санкций (как и отдельно взятая уголовная санкция) за генетические преступления проявляет свою «жизнеспособность», функциональную специфичность в соотношении с уголовной ответственностью и наказанием и только через них. Взаимообусловленность этих уголовно-правовых категорий выражает структурно-функциональную сущность уголовных мер противодействия преступности в целом и с отдельными видами ее проявлений. В этом сочетании уголовные санкции выполняют двоякую роль. С одной стороны, уголовная санкция является правовой формой выражения (закрепления) уголовной ответственности; с другой – она есть не что иное, как правовая мера (масштаб) уголовного наказания.

Если дифференциация уголовной ответственности за генетические преступления осуществляется законодателем в процессе нормотворческой деятельности, то индивидуализация (дозировка) ответственности за конкретно совершенное какое-либо из анализируемой группы преступление выступает одной из основных функций правоприменительных органов. Первое сориентировано, прежде всего, на характер и степень общественной опасности деяния, посягающего, скажем, на жизнь или здоровье граждан, второе – в обязательном порядке включает в себя и личностные свойства субъекта преступления, смягчающие и отягчающие ответственность обстоятельства, при наличии которых и было совершено преступление.

Процесс дифференциации и индивидуализации уголовной ответственности за генетические преступления требует создания (наличия) стройной, внутренне согласованной системы уголовных санкций, обладающей структурной организацией, что и позволяет этой системе выполнять свои основные социальные функции.

Логично предположить, что уголовные санкции вообще и за генетические преступления, в частности, социально обусловлены в статике через уголовно-правовые нормы, дифференцирующие ответственность с учетом обобщенных (типичных) моделей преступного посягательства; в динамике – через акты компетентных государственных органов, индивидуализирующих ответственность за преступное деяние, обладающее неповторимой специфичностью, выходящей нередко за пределы уголовно-правовой нормы.

С точки зрения структуры уголовная санкция проявляет себя трояко: как структурное образование нормы уголовного права, как правовая мера уголовного наказания, выражающая его качественные и количественные признаки, и как правовая форма выражения (закрепления) уголовной ответственности. Вот почему очень важно, чтобы при конструировании уголовной санкции за генетические преступления не нарушалась органическая сбалансированность указанных ее структурных уровней. С этих позиций вряд ли можно признать обоснованным произвольное изменение структуры санкции (путем увеличения или снижения размера наказания, включения в ее содержание нового вида наказания и т. д.) без изменения структуры и содержания диспозиции нормы Особенной части уголовного закона. Обосновывается это тем, что структура уголовной санкции, равно как и ее содержание, социально обусловливается, прежде всего, спецификой преступного деяния, на изменение которой в первую очередь должна среагировать диспозиция нормы уголовного права.

Структура санкции, хотя и придает последней относительную самостоятельность, неразрывным образом (через свои системные свойства) связана со структурой диспозиции той нормы уголовного права, которую эта санкция «обслуживает», обеспечивает. Своеобразие структурного построения уголовных санкций за генетические преступления предопределено функциональным многообразием этих санкций. Прежде всего уголовная санкция выступает социально-правовым ориентиром в ценностной иерархии общественных отношений, охраняемых уголовным правом. С другой стороны, уголовная санкция отражает нравственный уровень развития общества. Чем общество выше в своем нравственном развитии, тем гуманнее и по

содержанию, и по условиям исполнения уголовно-правовых средств противодействия преступности.

Главная социальная ценность функциональной природы уголовных санкций, в том числе и за генетические преступления, заключается в том, что они (санкции) выступают важным и основным звеном, посредством которого осуществляется своеобразная взаимосвязь между государством и лицом, совершившим преступление, в процессе реализации отношений уголовной ответственности. Именно через указанную взаимосвязь и подается социально-нравственный импульс, производящий перестройку психологии лица, совершившего преступление, на пути его исправления и перевоспитания, чем достигается цель и частного предупреждения.

В тех случаях, когда преступление не совершается, санкция солидарно с диспозицией уголовно-правовой нормы воздействует на сознание лиц, склонных к совершению преступления, достигая в пределах возможного цели общего предупреждения.

Все многообразие функций уголовные санкции за генетические преступления реализуют не только через свои системно-структурные и содержательные свойства, признаки, но и посредством своего видового (типового) многообразия.

Однако очевидно и другое. В настоящее время назрела настоятельная необходимость в процессе научно обоснованной и практически апробированной формализации подавляющего числа уголовных санкций, среди которых особое место занимают санкции, предусматривающие наказание за причинение вреда жизни и здоровью потерпевшего. Причем процесс формализации санкций должен развиваться не только по пути сужения оценочных пределов законодателем при установлении размеров наказания, но и по пути выработки конкретных, формально определенных критериев (ориентиров), которыми мог бы пользоваться суд при назначении наказания.

Иными словами, принцип соотношения оценочного и формально определенного должен в равной степени касаться и диспозиции, и санкции уголовно-правовых норм, предусматривающих уголовную ответственность за генетические преступные посягательства на интересы человека, общества, государства.

Используя высказанные нами и иные, наработанные другими авторами соображения, постараемся построить систему уголовных санкций за генетические преступления, общественная опасность которых достаточно обозначила себя фактически рельефно, и потому напрашивается их уголовно-правовая квалификация и классификация. Поскольку основная цель данной статьи заключается в постановочной формуле построения диспозиций и санкций за генные преступления, постольку то и другое будет носить условный, предполагаемый характер, наиболее желанный вариант. Излагать генные преступления предлагается в следующей редакции с учетом их содержательной и системно-структурной специфики.

Глава. Генетические преступления

Статья 1. Умышленное создание или модификация живых организмов или вирусов

1. Умышленное создание или модификация живых организмов или вирусов в целях поставления в опасность жизни и здоровья человека, причинения ущерба собственности, биологическому разнообразию и экологическому благополучию территории наказывается лишением свободы на срок от пяти до пятнадцати лет с обязательным лишением права заниматься определенной деятельностью или занимать определенную деятельность на срок от пяти до пятнадцати лет.

2. Те же деяния, поставившие в опасность жизнь и здоровье человека, причинившие ущерб собственности, биологическому разнообразию или экологическому благополучию территории, наказываются лишением свободы на срок от семи до семнадцати лет с обязательным лишением права заниматься определенной деятельностью или занимать определенную деятельность на срок от семи до семнадцати лет.

Деяния, предусмотренные частями первой или второй настоящей статьи, совершенные:

а) лицом с использованием своего должностного (служебного) положения;
б) организованной группой лиц – наказываются лишением свободы на срок от девяти до двадцати лет с обязательным лишением права заниматься определенной деятельностью или занимать определенную деятельность на срок от девяти до двадцати лет.

Статья 2. Нарушение правил биологической безопасности

Нарушение правил биологической безопасности, повлекшее по неосторожности распространение генетически модифицированных или искусственно созданных живых организмов и вирусов, наказывается принудительными работами на срок до пяти лет или лишением свободы на тот же срок.

Статья 3. Применение генной терапии или иного трансгенеза

Применение генной терапии или иного трансгенеза в отношении человека в случае, если он или его законные представители не осведомлены о характере и целях вмешательства, его возможных последствиях и не дали на его применение своего согласия, наказывается принудительными работами на срок до пяти лет или лишением свободы на тот же срок.

Статья 4. Внесение изменений в геном человеческого эмбриона

Внесение изменений в геном человеческого эмбриона путем применения технологий генной инженерии с последующим культивированием эмбриона и его переносом в организм матери в случае, если оба родителя ребенка не осведомлены о характере и целях вмешательства, его возможных последствиях и не дали на его применение своего согласия, наказывается принудительными работами на срок до пяти лет или лишением свободы на тот же срок.

Статья 5. Похищение криоконсервированного человеческого эмбриона

1. Похищение криоконсервированного человеческого эмбриона, предназначенного для переноса в организм матери, наказывается принудительными работами на срок от двух до пяти лет или лишением свободы на срок от двух до пяти лет.

2. То же деяние, совершенное лицом с использованием своего (должностного) служебного положения, наказывается лишением свободы на срок от трех до семи лет.

3. Деяние, предусмотренное частями первой или второй настоящей статьи, совершенное организованной группой лиц, наказывается лишением свободы на срок от трех до девяти лет.

Статья 6. Умышленное уничтожение криоконсервированного человеческого эмбриона

1. Умышленное уничтожение криоконсервированного человеческого эмбриона, предназначенного для переноса в организм матери, наказывается принудительными работами на срок от двух до пяти лет или лишением свободы на срок от двух до пяти лет.

2. То же деяние, совершенное лицом с использованием своего (должностного) служебного положения, наказывается лишением свободы на срок от трех до семи лет.

3. Деяние, предусмотренное частями первой или второй настоящей статьи, совершенное организованной группой лиц, наказывается лишением свободы на срок от трех до девяти лет.

Статья 7. Умышленная подмена человеческого эмбриона

Умышленная подмена человеческого эмбриона при его переносе в организм матери наказывается лишением свободы на срок от трех до девяти лет с пожизненным лишением права заниматься определенной деятельностью или занимать определенную должность.

Статья 8. Нарушение правил подготовки, хранения, транспортировки и разморозки криоконсервированного человеческого эмбриона

Нарушение правил подготовки, хранения, транспортировки и разморозки криоконсервированного человеческого эмбриона, предназначенного для переноса в организм матери, повлекшее по неосторожности гибель эмбриона, наказывается принудительными работами на срок от двух до пяти лет или лишением свободы на тот же срок.

Статья 9. Похищение или вымогательство человеческих гамет в репродуктивных целях

Похищение или вымогательство человеческих гамет для последующего использования в репродуктивных целях наказываются лишением свободы на срок от трех до семи лет.

Статья 10. Насильственное похищение или вымогательство человеческих гамет

Похищение или вымогательство человеческих гамет для последующего использования в репродуктивных целях с применением насилия или угрозой его применения наказываются лишением свободы на срок от пяти до десяти лет.

Статья 11. Похищение или вымогательство человеческих гамет в целях их уничтожения

1. Похищение или вымогательство человеческих гамет в целях их уничтожения, если это повлекло заведомо для виновных невозможность для потерпевшего или потерпевших зачать ребенка, наказывается лишением свободы на срок от пяти до десяти лет.
2. Те же деяния, совершенные организованной группой, наказываются лишением свободы на срок от семи до двенадцати лет.

Статья 12. Незаконное использование человеческих гамет

Незаконное использование человеческих гамет в репродуктивных целях путем их подмены или использования без согласия владельца наказывается принудительными работами на срок от двух до пяти лет или лишением свободы на срок от трех до семи лет.

Статья 13. Нарушение правил подготовки, хранения, транспортировки и разморозки криоконсервированного человеческого эмбриона

Нарушение правил хранения, перевозки и разморозки криоконсервированных человеческих гамет, повлекшее по неосторожности их непригодность к применению для вспомогательных репродуктивных технологий или утрату ими биологических свойств, наказывается лишением свободы на срок от трех до семи лет с лишением права заниматься определенной деятельностью или занимать определенную должность на тот же срок.

Заключение

Предлагаемый проект пенализации генетических преступлений, очевидно, покажется многим читателям неправильным или по крайней мере дискуссионным. При определении вида наказания мы исходили из санкций аналогичных преступлений, уже предусмотренных действующим уголовным законом. При этом мы сконцентрировались на двух санкциях – лишение свободы на определенный срок и принудительные работы. В ряде случаев предлагается в качестве обязательного применения лишения права заниматься определенной деятельностью или занимать определенные должности. Санкции за преступления против личности в определенной степени служат эталоном конструирования санкций преступлений, посягающих на другие объекты уголовно-правовой охраны. По этой причине мы намеренно отказались от использования штрафа, поскольку данное наказание, по нашему мнению, не отра-

жает специфики генетических преступлений, объект которых, как уже указывалось, шире общественных отношений по охране личности.

Мы также отдаем отчет, что приведенный перечень статей искусственно выделен нами под названием «генетические преступления». При фактической криминализации, скорее всего, эти нормы «разбегутся» по разным главам Уголовного кодекса, что не может не повлиять на восприятие справедливости той или иной санкции.

Список литературы

1. Генетические исследования: законодательство и уголовная политика : монография / под редакцией И. Я. Козаченко, Д. Н. Сергеева. – Москва : Проспект, 2021. – 200 с. – Текст : непосредственный.

2. Коробеев, А. И. Уголовно-правовая политика России: от генезиса до кризиса : монография / А. И. Коробеев. – Москва : Юрлитинформ, 2019. – 352 с. – Текст : непосредственный.

3. Кунц, Е. В. Влияние современных медицинских технологий на развитие уголовного права / Е. В. Кунц. – Текст : непосредственный // Право и современные технологии в медицине / ответственный редактор А. А. Мохов, О. В. Сушкова. – Москва : Проспект, 2021. – С. 327–331.

4. Мор, Т. Утопия / Т. Мор. – 2-е издание. – Москва : АН СССР, 1953. – 297 с. – Текст : непосредственный.

5. Наумов, А. В. Российское уголовное право. Общая часть : курс лекций / А. В. Наумов. – 6-е издание, переработанное и дополненное. – Москва : Проспект, 2018. – 782 с. – Текст : непосредственный.

6. Правовое обеспечение безопасного использования генетической и геномной информации / под редакцией Л. Н. Берг, А. В. Лисаченко. – Москва : Юрайт, 2021. – 123 с. – Текст : непосредственный.

7. Уголовный кодекс Китайской Народной Республики / под общей редакцией А. И. Чучаева, А. И. Коробеева ; перевод с китайского Хуан Даосю. – 2-е издание. – Москва : юридическая фирма «Контракт», 2021. – 312 с. – Текст : непосредственный.

8. Степанов, О. А. Проблема уголовной ответственности в связи с развитием биотехнологий / О. А. Степанов. – Текст : непосредственный // Право и современные технологии в медицине. – Москва : Проспект, 2019. – С. 337–340.

9. 姜涛. 基因编辑之刑法规制及其限度 / 姜涛 // 东方法学. – 2021. – 年第2期. – 第69页.

10. 马永强. 基因科技犯罪的法益侵害与归责进路 / 马永强 // 法制与社会发展. – 2021. – 年第4. – 第104页.

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2021 г. Выпуск 4 (63). С. 189–196

УДК 343.98
DOI: 10.18822/byusu202201189-196

ПРОБЛЕМНЫЕ АСПЕКТЫ КРИМИНАЛИЗАЦИИ ПОСЯГАТЕЛЬСТВ НА СВОБОДУ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ОТНОШЕНИЙ В СФЕРЕ ЗАКУПОК ТОВАРОВ, РАБОТ И УСЛУГ

Короткий Филипп Викторович
кандидат юридических наук,
доцент ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет»
Краснодар, Россия
E-mail: philipp-kor@rambler.ru

Научная статья посвящена нормам уголовного закона, предусматривающим ответственность за посягательства на свободу экономических отношений в сфере закупок товаров, работ и услуг.

Автор проводит анализ преступлений в сфере публичных закупок на предмет их соответствия критериям криминализации. Обоснована социально-правовая обусловленность установления уголовной ответственности за совершение данных преступлений.

Выделены пороки юридической конструкции статей уголовного закона об ответственности за посягательства на свободу экономических отношений в сфере закупок товаров, работ и услуг. В их числе: отсутствие системности законодательства об уголовной ответственности за посягательства на свободу экономических отношений в сфере закупок товаров, работ и услуг; нарушение взаимосвязей уголовного закона с соответствующими нормами административно-деликтного законодательства; недостатки юридической техники.

Ключевые слова: свобода экономических отношений; преступления в сфере публичных закупок; криминализация; криминообразующие признаки; дифференциация уголовной ответственности.

PROBLEMIC ASPECTS OF CRIMINALIZATION OF EXCEPTIONS ON FREEDOM OF ECONOMIC RELATIONS IN THE SPHERE OF PUBLIC PROCUREMENT

Philip V. Korotkiy
Candidate of Law Sciences,
Associate Professor of the Kuban State University,
Krasnodar, Russia
E-mail: philipp-kor@rambler.ru

The scientific article is devoted to the norms of the criminal law, providing for liability for encroachments on the freedom of economic relations in the procurement of goods, works and services.

The author analyzes crimes in the field of public procurement for their compliance with the criteria of criminalization. The social and legal conditionality of the establishment of criminal responsibility for the commission of these crimes has been substantiated.

The defects of the legal structure of articles of the criminal law on liability for encroachments on the freedom of economic relations in the field of procurement of goods, works and services are highlighted. Among them: the lack of consistency of legislation on criminal liability for encroachments on the freedom of economic relations in the procurement of goods, works and services; violation of the relationship of the criminal law with the relevant norms of administrative and tort legislation; disadvantages of legal technique.

Keywords: freedom of economic relations; procurement crimes; criminalization; crime features; the differentiation of criminal responsibility.

Введение

Отечественная модель экономики традиционно характеризуется доминированием государства как наиболее активного субъекта хозяйственной деятельности. В немалой степени это объясняется многообразными обязательствами, взятыми на себя российским государством. Для их исполнения органы государственной власти и органы местного самоуправления, а также связанные с ними организации, учреждения и внебюджетные фонды закупают необходимые товары, работы и услуги. Не будет преувеличением утверждение, согласно которому эффективность государства как социального института находится в прямой зависимости от организации и проведения публичных закупок.

Посягательства на отношения, складывающиеся в сфере закупок товаров, работ и услуг для государственных и муниципальных нужд, несомненно, представляют общественную опасность. Различного рода криминальные сговоры организаторов и участников публичных закупок нивелируют базовые принципы рыночной экономики, ущемляют права и законные интересы иных субъектов предпринимательской деятельности. Свобода экономических отношений подразумевает возможность равного доступа на рынок и участия в торгах всех добросовестных продавцов, что в подобных ситуациях становится невозможным. Кроме того, названные посягательства подрывают результативность осуществления государственных функций. Необоснованные траты бюджетных средств обуславливают чрезмерную налоговую нагрузку на российское население.

Во многом руководствуясь указанными обстоятельствами, законодатель счёл необходимым выделить посягательства в сфере закупок товаров, работ и услуг, в отдельные составы преступлений. Однако это решение остаётся предметом пристального внимания со стороны научного сообщества. Указанные вопросы в последнее время служат предметом внимания со стороны таких авторов, как К. С. Арутюнян, Ю. Л. Анисимов, М. В. Бавсун, В. В. Бессонова, В. Н. Борков, Д. В. Гук, В. В. Дараган, Е. А. Корчагин, Д. В. Исютин-Федотков, И. А. Любый, А. В. Макаров, М. Ф. Максютов, И. И. Ординарцев, Э. А. Прохоров, Ю. В. Скосырская, А. Н. Сулейманов, Ш. М. Шурпаев, А. К. Щегулин и др. Признавая безусловную научную ценность трудов названных авторов, следует отметить, что в дополнительном теоретическом обосновании и анализе нуждаются как социально-правовая обусловленность криминализации преступлений в сфере закупок товаров, работ и услуг, так и конструкции посвящённых им статей уголовного закона.

Цель научной статьи состоит в критическом анализе социально-правовой обусловленности криминализации посягательств на свободу экономических отношений в сфере закупок товаров, работ и услуг. В связи с этим автор ставит перед собой следующие задачи: провести последовательный анализ критериев криминализации посягательств на свободу экономических отношений в сфере публичных закупок; дать оценку подходов законодателя к криминализации указанных преступлений; сформулировать предложения по совершенствованию действующего в данной сфере законодательства.

Названные задачи решаются в научной статье с опорой на общенаучный диалектический метод познания, а также такие общенаучные и частно-научные методы исследования, как анализ, синтез, структурно-функциональный, формально-юридический, сравнительно-правовой и иные методы научного познания.

Результаты и обсуждение

Статьи, предусматривающие ответственность за посягательства в сфере закупок товаров, работ и услуг, были включены в Уголовный кодекс Российской Федерации от 13 июня 1996

г. № 63-ФЗ [2] сравнительно недавно, в 2017–2018 гг. [3–5]. Речь идёт о статьях 200.4, 200.5, 200.6, 201.1 и 285.4 уголовного закона.

Разумеется, это не означает, что ранее преступные посягательства на сферу публичных закупок не получали уголовно-правовую оценку. Как правило, соответствующие деяния квалифицировались по статьям 159, 160, 165, 201, 285, 285.1, 285.2, 286, 290, 292, 293 УК РФ. Названные статьи активно применяются по делам о посягательствах в сфере публичных закупок и сегодня. Однако, интересующий нас объект преступления, а именно свобода экономических отношений в сфере закупок товаров, работ и услуг, выступает в описываемых в них составах преступлений лишь в роли факультативного объекта.

Доктринальные требования, касающиеся критериев криминализации общеизвестны. Среди них принято выделять: характер и степень общественной опасности деяния; его распространённость на практике; недостаточность иных, не уголовно-правовых средств противодействия совершению деяния; наличие у вводимого уголовно-правового запрета превентивного потенциала; историко-правовые и социально-психологические основания установления уголовной ответственности за совершение деяния; возможность его выявления, доказывания и процессуального оформления [19, с. 25; 11, с. 103; 7, с. 17–20; 15, с. 75–76].

Общественная опасность посягательств на свободу экономических отношений в сфере закупок товаров и услуг проявляется в том, что они нарушают конституционные принципы функционирования рыночной экономики, сопровождаются нерациональным расходованием публичных финансов, снижают эффективность государственного управления, а также создают угрозу национальной безопасности нашей страны. Картели и коррупция в системе государственных закупок приводят к увеличению стоимости закупаемых жизненно важных товаров и услуг, снижению их качества и количества, сдерживая иностранные инвестиции и подрывая доверие к правительству [27, p. 672].

Объёмы государственных и корпоративных закупок в денежном выражении приближаются к одной трети внутреннего валового продукта. Так, в частности, в 2019 году они превысили тридцать триллионов рублей [23]. При этом Счетная палата РФ ежегодно фиксирует рост нарушений в сфере публичных закупок. Число нарушений, выявляемых органами контроля (аудита) в сфере закупок, с 2014 г. по 2020 г. возросло в четыре раза, с 21,5 до 83,5 тыс. нарушений, а общая сумма финансовых нарушений выросла почти в шесть раз, с 66,1 до 362 млрд рублей. Так, в 2016 г. нарушения в сфере публичных закупок исчислялись в 53,05 млрд руб., в 2017 – 118,3 млрд руб., в 2018 г. – 294,6 млрд. руб., в 2019 г. – 236,6 млрд руб., в 2020 г. – в 362,6 млрд руб. [24].

Однако, новеллы уголовного закона о посягательствах на свободу экономических отношений в сфере закупок товаров, работ и услуг вплоть до настоящего времени так и не заработали. Об это свидетельствуют данные Судебного департамента при Верховном Суде РФ, согласно которым на протяжении 2019–2020 гг. по статьям 200.4 и 200.6 УК РФ не было вынесено ни одного приговора. За этот же период по ст. 200.5 УК РФ были осуждены шесть человек, а по ст. 201.1 УК РФ – три человека [22]. Логично предположить, что официальная картина преступности в рассматриваемой сфере не соответствует истинному положению дел. В свою очередь, объяснение этому можно найти в недостатках действующего уголовного закона.

Общественные отношения в сфере закупок товаров, работ и услуг регламентированы нормами целого ряда отраслей права. Так, в частности, общие основы осуществления закупочной деятельности подчинены нормам гражданского законодательства, процедура закупок и контроль в данной сфере урегулированы административно-правовыми нормами, а вопросы финансирования госзакупок находятся в области действия финансового и бюджетного права. Названными обстоятельствами во многом объясняется бланкетность значительного числа уголовно-правовых норм, предусматривающих ответственность за преступления в сфере закупок товаров, работ и услуг.

Уголовно-правовые нормы об ответственности за посягательства на свободу экономических отношений в сфере закупок товаров, работ и услуг призваны выполнять функцию охраны указанных общественных отношений [12, с. 118]. Нормы уголовного права приобретают регулятивный характер лишь применительно к социальным отношениям, складывающимся между виновным в совершении преступного посягательства и государством в лице его правоохранительных органов [20, с. 135]. Тем самым, роль уголовного права видится как вспомогательная, на что справедливо обращено внимание в научной литературе [13, с. 10; 26, с. 102]. Так, давние доктринальные снования имеет тезис, согласно которому потенциал уголовного права следует применять для охраны общественных отношений лишь в тех случаях, когда их защита иными средствами оказывается малорезультативной [25, с. 40].

Криминализованные законодателем деяния, посягающие на свободу экономических отношений в сфере закупок товаров, работ и услуг, не могут быть эффективно пресечены административно-правовыми средствами. Как правило, в таких случаях речь идёт о значительных денежных суммах, к завладению которыми стремятся злоумышленники. Поэтому результативное пресечение подобных посягательств возможно лишь посредством угрозы применения к виновным уголовного наказания. Не случайно в качестве криминообразующих признаков законодателем, в частности, избраны:

– в ст. 200.4 и 200.6 УК РФ – причинение крупного ущерба, который согласно примечанию к ст. 170.2 УК РФ составляет сумму, превышающую два миллиона двести пятьдесят тысяч рублей;
– в ст. 201.1 УК РФ – причинение существенного вреда охраняемым законом интересам общества или государства при выполнении государственного оборонного заказа. Как разъяснил Пленум Верховного Суда РФ в п. 8 Постановления № 21 от 29 июня 2021 г. [6], причинение существенного вреда «выражается, в частности, в значительных расходах»;
– в ст. 285.1 и ст. 285.2 УК РФ – совершение деяния в крупном размере, которым в соответствии с примечанием к ст. 285.1 признается сумма бюджетных средств, превышающая один миллион пятьсот тысяч рублей.

Статьи уголовного закона об ответственности за посягательства на свободу экономических отношений в сфере закупок товаров, работ и услуг обладают несомненным превентивным потенциалом, оказывая предупредительное воздействие на лиц, склонных к совершению преступлений [16, с. 111]. Криминологические исследования свидетельствуют, что преступления в сфере закупочной деятельности, как правило, совершают лица с высшим образованием, обладающие специальными познаниями в области экономики и юриспруденции [10, с. 17; 21, с. 101; 30, p. 34; 29, p. 52; 31, p. 26]. Они следят за изменениями действующего законодательства, в состоянии оценить риски привлечения к уголовной ответственности и отказаться от преступных намерений. Будучи глубоко интегрированными в общество, подобные лица ведут внешне вполне добропорядочный образ жизни и нередко имеют высокий социальный статус, вероятность потери которого также выступает значимым антикриминогенным фактором.

Что касается таких критериев криминализации, как историко-правовые и социально-психологические основания установления уголовной ответственности за преступления в сфере публичных закупок, то следует указать на то, что аналогичные уголовно-правовые запреты встречаются в отечественном законодательстве, начиная с середины XVII века. Нынешнее российское общество также безусловно рассматривает посягательства на сферу закупок товаров, работ и услуг в качестве преступных.

Соответствие рассматриваемых преступных посягательств последнему критерию, а именно возможности их выявления, доказывания и процессуального оформления, также сомнений не вызывает. Посягательства на свободу экономических отношений в сфере закупок товаров, работ и услуг довольно близки к коррупционным преступлениям, методика расследования которых обстоятельно разработана в криминалистической науке. Кроме того, в по-

следние годы появились и работы, непосредственно посвящённые вопросам раскрытия и расследования преступлений анализируемой группы [14].

В пользу необходимости установления уголовной ответственности за преступления в сфере публичных закупок свидетельствует и зарубежный опыт. Как отмечает Alison Jones, несмотря на все более согласованные усилия и инициативы национальных и международных организаций по борьбе с картелями и коррупцией, случаи взяточничества и (или) сговора на торгах распространены даже в странах с невысоким уровнем коррупции, таких как Сингапур и Канада [27, p. 671–672]. В зарубежной литературе соответствующая проблематика имеет давние традиции научного анализа. Так, в частности, одним из перспективных направлений остаётся разработка системы индикаторов коррупции в сфере государственных закупок [28, p. 245–267].

Таким образом, решение законодателя криминализовать посягательства на свободу экономических отношений в сфере закупок товаров, работ и услуг следует оценить как вполне обоснованное и своевременное. В этой связи парадоксальными выглядят упоминавшиеся данные судебной статистики, согласно которым статьи 200.4, 200.5, 200.6, 201.1 и 285.4 УК РФ практически не применяются на практике. Объяснение этого, как представляется, следует искать в пороках юридической конструкции названных статей уголовного закона.

Прежде всего, обращает на себя внимание асистемность законодательства об уголовной ответственности за посягательства на свободу экономических отношений в сфере закупок товаров, работ и услуг. Так, ст. 200.5 УК РФ, очевидно, сконструирована по шаблону статей 204, 290, 291 УК РФ, предусматривающих ответственность за коммерческий подкуп и взяточничество, а ст. 201.1 и ст. 285.4 УК РФ – по образцу ст. 201 и ст. 285 УК РФ, соответственно. Однако сделано это далеко не последовательно. Так, не дифференцирована уголовная ответственность в зависимости от такого квалифицирующего признака, как незаконное получение указанными в ч. 1 ст. 200.5 УК РФ лицами вознаграждения за заведомо незаконные действия (бездействие).

Кроме того, законодательно не прописаны вопросы ответственности за посредничество в подкупе в сфере публичных закупок, как это сделано применительно к посредничеству во взяточничестве и коммерческом подкупе. Далее, следуя этой же логике, необходимо было также законодательно обозначить границы ответственности за мелкий подкуп.

Также следует обратить внимание на то, что особенности уголовной ответственности за преступления, совершаемые при выполнении государственного оборонного заказа, выделены лишь применительно к злоупотреблению полномочиями (ст. 201.1 УК РФ) и злоупотреблению должностными полномочиями (ст. 285.4 УК РФ). При этом применительно к превышению должностных полномочий аналогичное законодательное решение воплощено не было [см.: 18, с. 47].

Нарушены и системные взаимосвязи уголовного закона с нормами административно-деликтного законодательства. Более того, во многих случаях, где можно предполагать целесообразность установления административно-правовых запретов, они попросту отсутствуют. Так, к примеру, вплоть до настоящего времени не предусмотрена юридическая ответственность за посягательства на свободу экономических отношений в сфере закупок товаров и услуг, совершённые по неосторожности, а также «при отсутствии корыстной или иной личной заинтересованности и (или) крупного ущерба» [8, с. 34]. Данный пробел также должен быть восполнен.

Новеллы статей 200.4, 200.5, 200.6, 201.1 и 285.4 УК РФ не свободны и от недостатков юридической техники, что также негативным образом сказывается на возможности их применения. Так, наименование ст. 200.4 УК РФ содержит термин «злоупотребления», а в её тексте идёт речь о «нарушении законодательства». Это однопорядковые, но далеко не синонимичные категории [17, с. 55; 9, с. 52]. Также можно заметить противоречие между наименованием ст. 200.5 УК РФ, где названы лишь три возможных субъекта данного преступления, и диспозицией ч. 1 ст. 200.5 УК РФ, где дан более широкий их перечень. Учитывая вы-

сказанные замечания, наименования указанных статей уголовного закона должны быть приведены в соответствие с их диспозициями.

Заключение и выводы

Тем самым, можно заключить, что криминализация посягательств на свободу экономических отношений в сфере закупок товаров, работ и услуг вполне обоснована и опирается на твёрдые социально-правовые основания. Вместе с тем, новеллы уголовного закона в этой части изобилуют недостатками, требующими устранения. Очерченный круг вопросов нуждается в дальнейшем осмыслении в целях поиска наиболее эффективных законодательных моделей уголовно-правового противодействия преступным посягательствам.

Список литературы

1. Конституция Российской Федерации : (принята всенародным голосованием 12.12.1993 с изменениями, одобренными в ходе общероссийского голосования 01.07.2020). – Текст : непосредственный // Российская газета. – 2020. – 4 июля (№ 144).

2. Уголовный кодекс Российской Федерации : федеральный закон от 13.06.1996 № 63-ФЗ. – Текст : непосредственный // Собрание законодательства Российской Федерации. – 1996. – № 25. – Ст. 2954.

3. О внесении изменений в Уголовный кодекс Российской Федерации и статью 151 Уголовно-процессуального кодекса Российской Федерации : федеральный закон РФ от 27.12.2018 № 520-ФЗ. – Текст : непосредственный // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2018. – № 53, Ч. 1. – Ст. 8446.

4. О внесении изменений в Уголовный кодекс Российской Федерации и статью 151 Уголовно-процессуального кодекса Российской Федерации : федеральный закон от 23.04.2018 № 99-ФЗ. – Текст : непосредственный // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2018. – № 18. – Ст. 2569.

5. О внесении изменений в Уголовный кодекс Российской Федерации и статью 151 Уголовно-процессуального кодекса Российской Федерации : федеральный закон Российской Федерации от 29.12.2017 № 469-ФЗ. – Текст : непосредственный // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2018. – № 1, Ч. 1. – Ст. 53.

6. О некоторых вопросах судебной практики по делам о преступлениях против интересов службы в коммерческих и иных организациях (статьи 201, 201.1, 202, 203 Уголовного кодекса Российской Федерации) : постановление Пленума Верховного Суда РФ от 29.06.2021 № 21. – Текст : непосредственный // Российская газета. – 2021. – 16 июля (№ 159).

7. Антонов, А. Д. Теоретические основы криминализации и декриминализации : диссертация на соискание ученой степени кандидата юридических наук / А. Д. Антонов. – Москва, 2001. – 182 с. – Текст : непосредственный.

8. Быков, А. В. Отдельные проблемы криминализации коррупционных деяний, совершаемых в сфере служебных отношений (размышления о ст. 200.4, 200.5 УК РФ) / А. В. Быков. – Текст : непосредственный // Служебные преступления: вопросы теории и практики правоприменения : сборник материалов Международной научно-практической конференции (17 мая 2018 года, г. Хабаровск). – Хабаровск : Юрист, 2018. – С. 34–40.

9. Гладких, В. И. Злоупотребления в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных или муниципальных нужд (ст. 200.4 УК РФ): теоретический анализ / В. И. Гладких. – Текст : непосредственный // Российская юстиция. – 2019. – № 3. – С. 51–54.

10. Егоров, О. Н. Криминологическая характеристика преступлений в сфере закупок для государственных и муниципальных нужд / О. Н. Егоров. – Текст : непосредственный // Правопорядок: история, теория, практика. – 2018. – № 3 (18). – С. 16–19.

11. Епифанова, Е. В. Общественная опасность как научная категория, законодательная дефиниция: история и современность : монография / Е. В. Епифанова. – Москва : Юрлитинформ, 2012. – 152 с. – Текст : непосредственный.

12. Жариков, Ю. С. Уголовно-правовое регулирование и механизм его реализации / Ю. С. Жариков. – Москва : Юриспруденция, 2009. – 212 с. – Текст : непосредственный.

13. Жилкин, М. Г. Дифференциация уголовной ответственности за преступления в сфере предпринимательской деятельности: проблемы теории и практики : диссертация на соискание ученой степени доктора юридических наук / М. Г. Жилкин. – Москва, 2019. 402 с. – Текст : непосредственный.

14. Земскова, Е. Н. Расследование преступлений в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд : диссертация на соискание ученой степени кандидата юридических наук / Е. Н. Земскова. – Москва, 2018. – 537 с. – Текст : непосредственный.

15. Злобин, Г. А. Основания и принципы уголовно-правового запрета / Г. А. Злобин. – Текст : непосредственный // Советское государство и право. – 1980. – № 1. – С. 75–76.

16. Липинский, Д. А. Регулятивная функция уголовной ответственности как одно из правовых средств предупреждения преступности / Д. А. Липинский. – Текст : непосредственный // Современное право. – 2015. – № 5. – С. 107–113.

17. Любый, И. А. К вопросу об ответственности за злоупотребления в сфере государственных и муниципальных закупок / И. А. Любый. – Текст : непосредственный // Российская юстиция. – 2019. – № 5. – С. 54–56.

18. Любый, И. А. К вопросу уголовно-правовой защиты государственного и муниципального заказа в России / И. А. Любый. – Текст : непосредственный // Российский следователь. – 2018. – № 11. – С. 46–48.

19. Митюкова, Ю. А. Декриминализация преступлений: теоретический и практический аспекты : диссертация на соискание ученой степени кандидата юридических наук / Ю. А. Митюкова. – Москва, 2019. – 200 с. – Текст : непосредственный.

20. Петрова, Г. О. Уголовно-правовое регулирование и его средства: норма и правоотношение : диссертация на соискание ученой степени доктора юридических наук / Г. О. Петрова. – Нижний Новгород, 2003. – 304 с. – Текст : непосредственный.

21. Прохоров, Э. А. Личность преступника и мотивация совершения коррупционного преступления в сфере государственных закупок / Э. А, Прохоров. – Текст : непосредственный // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. – 2017. – № 9. – С. 97–103.

22. Судебный департамент при Верховном Суде РФ : [сайт]. – URL: http://www.cdep.ru (дата обращения: 20.10.2021). – Текст : электронный.

23. Счетная палата: потенциал контрактной системы раскрыть пока не удалось. – Текст : электронный // Счетная палата Российской Федерации. – URL: https://ach.gov.ru/checks/12218 (дата обращения: 20.10.2021). – Текст : электронный.

24. Счетная палата Российской Федерации : [сайт]. – URL: https://ach.gov.ru/ (дата обращения: 20.10.2021). – Текст : электронный.

25. Таганцев, Н. С. Русское уголовное право : лекции : часть общая : в 2 томах / Н. С. Таганцев. – Москва : Наука, 1994. – Т. 1. – 380 с. – Текст : непосредственный.

26. Тищенко, Е. В. Уголовная ответственность за преступления в сфере государственных и муниципальных закупок: сравнительно-правовой анализ / Е. В. Тищенко. – Текст : непосредственный // Вопросы российского и международного права. – 2016. – Т. 6, № 11А. – С. 93–107.

27. Jones, A. Combatting Corruption and Collusion in UK Public Procurement: Proposals for Post-Brexit Reform / A. Jones // Modern Law Review. – 2021. Vol. 84, Iss. 4. – P. 667–707.

28. Ferwerda, J. Corruption in Public Procurement: Finding the Right Indicators / J. Ferwerda, I. Deleanu, B. Unger // European Journal on Criminal Policy and Research. – 2017. – Vol. 23. – P. 245–267.

29. Kühn, S. Curbing Corruption in Public Procurement : A Practical Guide / S. Kühn, L. B. Sherman. – Berlin : Transparency International, 2014. – 40 p.

30. Rose-Ackerman, S. Corruption and Government: Causes, Consequences, and Reform / S. Rose-Ackerman, B. J. Palifka. – 2nd ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 2016. – 266 p.

31. Søreide, T. Corruption in Public Procurement: Causes, Consequences and Cures / T. Søreide. – Bergen : Christian Michelsen Institute, 2002. – 50 p.

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 г. Выпуск 1 (64). С. 197–204

УДК 341.4:343.241
DOI: 10.18822/byusu202201197-204

СИСТЕМА НАКАЗАНИЙ В СОВРЕМЕННОМ УГОЛОВНОМ ПРАВЕ ФРАНЦИИ

Подройкина Инна Андреевна
доктор юридических наук,
заведующий кафедрой уголовно-правовых дисциплин
Ростовского филиала Российской таможенной академии
Ростов-на-Дону, Россия
E-mail: 919820@mail.ru

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ
в рамках научного проекта № 20-011-00141.

Цель исследования состоит в анализе уголовного законодательства Франции с точки зрения возможного заимствования опыта для совершенствования отечественной системы уголовных наказаний.

В основу работы положен метод системного анализа, а наряду с ним также формально-юридический, сравнительно-правовой и конкретно-социологический методы.

Результаты. В статье высказывается позиция, что процесс построения системы уголовных наказаний в России нельзя признать завершенным, так как из всего перечня наказаний, закрепленного в ст. 44 УК РФ и насчитывающего 13 видов наказаний, востребованными на практике оказались лишь некоторые из них, такие как штраф, обязательные и исправительные работы, лишение права занимать определенные должности или заниматься определенной деятельностью и лишение свободы. По мнению автора, построение эффективной системы наказаний в России невозможно без обращения к зарубежному опыту, в связи с чем он проводит анализ французского уголовного законодательства в части определения системы наказаний.

Выводы. На основе проведенного анализа в статье делается вывод о том, что ряд положительных моментов, связанных с регламентацией системы наказаний по УК Франции, может быть учтен российским законодателем при дальнейшем совершенствовании отечественной системы уголовных наказаний.

Ключевые слова: наказание, цели наказания, система уголовных наказаний, зарубежный опыт, заимствование, совершенствование.

THE SYSTEM OF PUNISHMENTS IN MODERN FRENCH CRIMINAL LAW

Inna A. Podroykina
Doctor of Law Sciences
Head of the Department of Criminal Law Disciplines
Rostov Branch of the Russian Customs Academy
Rostov-on-Don, Russia
E-mail: 919820@mail.ru

The reported study was funded by RFBR, project number 20-011-00141

The purpose of the study is to analyze the criminal legislation of France from the point of view of possible borrowing of experience to improve the domestic system of criminal penalties.

The work is based on the method of system analysis, and along with it also formal-legal, comparative-legal and concrete sociological methods.

Results: The article expresses the position that the process of building a system of criminal penalties in Russia cannot be considered complete, since from the entire list of penalties enshrined in Art. 44 of the Criminal Code of the Russian Federation, and numbering 13 types of punishments, only some of them turned out to be in demand in practice, such as a fine, compulsory and corrective labor, deprivation of the right to hold certain positions or engage in certain activities, and imprisonment. According to the author, the construction of an effective system of punishments in Russia is impossible without referring to foreign experience, in connection with which he analyzes the French criminal law in terms of determining the system of punishments.

Conclusions: Based on the analysis, the article concludes that a number of positive aspects related to the regulation of the system of punishments under the French Criminal Code can be taken into account by the Russian legislator in the further improvement of the domestic system of criminal penalties.

Keywords: punishment, goals of punishment, system of criminal penalties, foreign experience, borrowing, improvement.

Введение

Принятый в 1996 году Уголовный кодекс России существует уже 25 лет. За этот период в него вносились многочисленные изменения, которые анализируются и достаточно активно обсуждаются в теории уголовного права [1], в том числе и в работах автора данной статьи [2]. Специалисты справедливо обращают внимание на то, что современное общество меняется, меняется преступность, появляются новые виды преступлений, а также новые способы совершения «классических» преступлений. Так, не секрет, что за время пандемии значительно возросло количество совершаемых мошенничеств с использованием информационных технологий.

Новая реальность требует новых форм реакции на преступное поведение. Не случайно в науке уголовного права появляются фундаментальные работы, обосновывающие необходимость введения в уголовный закон новых институтов, например института уголовно-правового воздействия, со смещением акцента государственно-правовой реакции на преступное поведение с наказания на иные меры воздействия, к числу которых относят в том числе и освобождение от уголовной ответственности, а также от наказания [3].

Вместе с тем, как справедливо отмечает В. В. Хилюта, несмотря на переход в новую постиндустриальную эпоху, пока ни общество, ни государство не готовы полностью отказаться от наказания в его классическом понимании [4], поэтому и сегодня вопросы эффективности наказания в целом [5], его отдельных видов и достижения ими целей, обозначенных в ст. 43 УК РФ [6], а также построения системы уголовных наказаний [7] не теряют своей актуальности.

Результаты и обсуждение

Анализ судебной практики показал, что из 13 видов наказаний, включенных в ст. 44 УК РФ, действительно востребованными судами являются лишь некоторые из них (обязательные работы, исправительные работы, штраф, лишение права занимать определенные должности или заниматься определённой деятельностью, лишение свободы), что свидетельствует о том, что систему наказаний нельзя назвать окончательно оформленной, а работа по ее наполнению должна быть продолжена.

Как мы писали ранее в одной из своих работ, считаем, что конструирование эффективной системы уголовных наказаний в нашем законодательстве невозможно без учета опыта решения соответствующих вопросов в законодательстве зарубежных стран, которое нередко предлагает интересные с позиции заимствования, подчас более корректные решения проблем, связанных с построением системы наказаний [8]. С учетом ограниченности объема статьи предлагаем исследовать уголовное законодательство Франции.

Как правило, в европейских странах, например в ФРГ, на уровне уголовного закона понятие наказания не раскрывается. УК Франции также не содержит такого понятия. Однако в ст. 130-1 УК Франции указано: «В целях обеспечения защиты общества, предотвращения совершения новых преступлений и восстановления социального равновесия, в соответствии с интересами потерпевшего, наказание имеет функции:

1) наказывать нарушителя;
2) содействовать его поправке (видимо, речь идет об исправлении. – *Прим. автора*), интеграции или реинтеграции» [9].

То есть перед наказанием поставлено три цели: 1) обеспечение защиты общества; 2) предотвращение совершения новых преступлений; 3) восстановление социального равновесия. Приведенные цели и по формулировкам, и по содержанию сходны с теми, которые описаны в ч. 2 ст. 43 УК РФ. Как мы видим, в УК Франции особо акцентировано внимание на том, что при наказании правонарушителя должны учитываться интересы потерпевшего, что весьма важно. Помимо целей наказания, в ст. 130-1 УК Франции определены его функции – наказать преступника и обеспечить его исправление, интеграцию и реинтеграцию.

По законодательству Франции уголовной ответственности могут подлежать не только физические, но и юридические лица, поэтому в нем выделены две подсистемы наказаний – для юридических и для физических лиц, регламентация которых осуществлена в самостоятельных разделах. В зависимости от того, какое деяние совершено – преступление, проступок или нарушение, определяется и перечень возможных наказаний. Аналогично российскому уголовному законодательству законодатель Франции выделяет также наказания основные и дополнительные.

В связи с тем, что в России субъектом преступления может выступать только физическое лицо, поэтому анализ французского законодательства считаем необходимым проводить только с позиции наказуемости физических лиц.

Совершение преступления предполагает назначение уголовного наказания. Перечень таких наказаний содержится в ст. 131-1 УК Франции. Фактически в названной статье перечисляются разновидности лишения свободы, которые дифференцированы по срокам (включая пожизненное заключение). Верхняя граница срочного лишения свободы в ст. 131-1 УК Франции определена в 30 лет, нижняя – в 10 лет.

В ст. 131-2 УК Франции указано, что «наряду с тюремным заключением или заключением под стражу не исключается применение штрафа, а также одного или нескольких дополнительных наказаний, предусмотренных ст. 131-10» [9].

Совершение проступка по УК Франции влечет возможность назначения исправительного наказания. Обращает на себя внимание то, что вариативность данных наказаний по сравнению с первоначальной редакцией УК Франции расширена. Теперь перечень исправительных наказаний насчитывает 8 видов (ранее он включал 6 видов) наказаний.

К ним относятся: 1) лишение свободы (тюремное заключение); 2) домашний арест под электронным наблюдением; 3) работа в общественных интересах; 4) штраф; 5) штрафодни; 6) испытание гражданства (стажировка); 7) наказания, лишающие прав или ограничивающие права; 8) наказание-возмещение. Наказания в перечне располагаются от наиболее к наименее строгому. За совершение проступков могут быть назначены и дополнительные наказания. В ст. 131-3 УК Франции указано, что названные наказания не исключаются из дополнительных, то есть некоторые из них могут быть назначены не только в качестве основных, но и в качестве дополнительных [9].

Как и при совершении преступления, сроки тюремного заключения за совершение проступка имеют определенную градацию (ст. 131-4 УК Франции), при этом его максимальный размер не может быть более 10 лет.

В тех случаях, когда преступление наказывается тюремным заключением, суд может вместо тюремного заключения выносить наказание в виде домашнего ареста под электрон-

ным наблюдением на срок от 15 дней до 6 месяцев, не превышающий срока тюремного заключения.

Такое наказание влечет за собой обязательство осужденного оставаться в своем доме или в любом другом месте, указанном судом или судьей, осуществляющим исполнение наказаний, и носить устройство, включающее передатчик для проверки соблюдения этого первого обязательства.

Осужденный может отсутствовать в своем доме в течение периода, определяемого судом или судьей, осуществляющим исполнение наказаний, только на время, необходимое для осуществления профессиональной деятельности, получения образования, стажировки, профессиональной подготовки или медицинского лечения, поиска работы, участия в семейной жизни или в любых проектах по интеграции или реинтеграции.

Суд может принять решение о том, что осужденному будут оказывать помощь в целях содействия его усилиям по социальной реабилитации.

В случае невыполнения осужденным своих обязательств судья, осуществляющий исполнение наказаний, может в порядке, установленном уголовно-процессуальным кодексом, либо ограничить его отсутствие, либо вынести постановление о его лишении свободы на оставшийся срок наказания.

Суд может также возложить на осужденного одно или несколько обязательств или запретов, предусмотренных статьями 132-44 и 132-45 УК Франции (например, сообщать о перемене места жительства, изменении места работы, заниматься профессиональной деятельностью, получать образование и др.) (ст. 131-4-1 УК Франции).

В ст. 131-5 УК Франции определено, что «в тех случаях, когда преступление наказывается лишением свободы, суд может вынести наказание в виде штрафодней, состоящее в том, что осужденный должен выплатить Казначейству сумму, общая сумма которой является результатом установления судьей ежедневного взноса в течение определенного количества дней. Сумма штрафа за каждый день определяется с учетом доходов подсудимого и не может превышать 1 000 евро. Количество штрафодней определяется с учетом обстоятельств преступления; оно не может превышать 360» [9].

В статье 131-5-1 описывается содержание наказания в виде испытания гражданства (стажировка). Так, в тех случаях, когда преступление наказывается тюремным заключением, суд может вместо или одновременно с тюремным заключением предписать, чтобы осужденный в течение срока, не превышающего одного месяца, проходил стажировку, характер, порядок и содержание которой определяются характером преступления и обстоятельствами, при которых оно было совершено. Стоимость прохождения данного курса не может превышать размера штрафа 3-го класса (т. е. 450 евро), и оплата его производится за счет осужденного. Речь идёт, например, о прохождении курса гражданства, направленного на изучение ценностей республики и обязанностей гражданина; курса повышения осведомленности о безопасности дорожного движения; курса повышения осведомленности об опасностях употребления наркотических средств; курса по обеспечению ответственности родителей; курса по борьбе с сексизмом и повышению осведомленности о равенстве между женщинами и мужчинами и др.

Законодатель Франции допускает назначение не одного, а нескольких видов наказаний, связанных с лишением или ограничением прав. Аналогично штрафу и испытанию гражданства (стажировке) в ст. 131-6 УК Франции подчеркивается, что лишение или ограничение прав может быть назначено вместо лишения свободы. Общее количество разновидностей названного наказания насчитывает 16 видов, оно затрагивает самые разные сферы деятельности человека, начиная от приостановления действия водительских прав и заканчивая установлением запрета на занятие коммерческой или промышленной деятельностью на определенный срок. Причем некоторые из перечисленных видов ограничений (на что прямо указано в анализируемой статье) могут назначаться наряду с лишением свободы (например, запрет на хранение или ношение оружия, конфискация вещи, которая служила или предназна-

чалась для совершения преступления, и др.). Максимальное количество ограничений, устанавливаемых наряду с тюремным заключением, в ст. 131-6 УК Франции не определено.

В ст. 131-7 УК Франции указано, что наказания, связанные с лишением прав, могут назначаться также вместо штрафа в тех случаях, когда санкция за преступление предусматривает в качестве наказания только штраф.

Вместо тюремного заключения суд может назначить выполнение неоплачиваемой общественно полезной работы на срок от 20 до 400 часов. Интересным представляется позиция законодателя, допускающего назначение данного вида наказания только с согласия осужденного (ст. 131-8 УК Франции). Обращает на себя внимание также тот факт, что в перечне наказаний работы стоят перед штрафом, а при конкретной регламентации – после.

В 2007 г. УК Франции был дополнен ст. 131-8-1, где говорится о наказании в виде наказания-возмещения. В частности, в тех случаях, когда преступление наказывается лишением свободы, суд может выносить вместо него или вместе с ним наказание в виде возмещения. То же самое относится и к тем случаям, когда правонарушение наказывается в качестве основного наказания одним штрафом. Наказание-возмещение – это обязанность осужденного в установленные судом сроки компенсировать ущерб потерпевшему. В отличие от штрафа, который всегда в итоге предполагает денежное выражение, с согласия потерпевшего и подсудимого возмещение вреда возможно в натуральной форме. Это может быть связано с восстановлением поврежденного имущества в связи с совершением преступления, причем как самим осужденным, так и приглашенным мастером, которого выберет осужденный и оплатит его работу.

При вынесении приговора о наказании-возмещении суд устанавливает максимальный срок тюремного заключения, не превышающий 6 месяцев, или максимальный размер штрафа, не превышающий 15 000 евро. Если преступление наказывается только штрафом, суд назначает штраф, который не может превышать 15 000 евро.

Положительным моментом является регламентация французским законодателем возможности сочетаемости тех или иных видов наказаний. Так, например, в ст. 131-9 УК Франции говорится о том, что тюремное заключение не может быть назначено вместе с некоторыми (даётся перечисление) из наказаний, предусмотренных в ст. 131-6, лишающих определенных прав или их ограничивающих, либо с наказанием в виде выполнения работы в общественных интересах. Наказание в виде штрафодней не может быть вынесено в совокупности со штрафом. В этой же статье указывается на необходимость определения в приговоре последствий неотбытия наказаний, назначенных в соответствии со статьями 131-5-1, 131-6 или 131-8 УК Франции. В частности, суд может установить максимальный срок тюремного заключения или максимальную сумму штрафа, который судья по исполнению наказаний может предписать привести в исполнение полностью или частично, если осужденный не соблюдает обязательства или запреты, вытекающие из вынесенного приговора (приговоров). Думается, что подобное решение законодателя обладает серьезным превентивным эффектом, так как осужденный заранее понимает последствия неисполнения приговора.

В УК Франции санкции сформулированы по принципу отражения лишь основных наказаний. Дополнительные наказания предусмотрены в Особенной части отдельно, применительно к группам преступных деяний, и приводятся в конце каждой главы. В ст. 131-10 УК Франции допускается возможность назначения одного или нескольких дополнительных наказаний за совершение преступления или проступка, к числу которых относятся, например, лишение или ограничение какого-либо права, конфискация вещи, конфискация животного, закрытие учреждения, опубликование приговора и др.

За нарушения могут быть назначены такие наказания, как штраф, лишение определенных прав или их ограничение, наказание-возмещение (ст. 131-12 УК Франции).

В ст. 131-13 УК Франции происходит дифференциация размеров штрафа в зависимости от класса нарушения. Так, например, за нарушение 1-го класса максимальный штраф не мо-

жет превысить 38 евро, а 5-го класса – 1 500 евро. При наличии рецидива допускается возможность увеличения штрафа до 3 000 евро при совершении нарушения 5-го класса.

За все нарушения 5-го класса может быть вынесено одно или несколько из следующих наказаний, связанных с лишением или ограничением прав:

1) приостановление действия водительского удостоверения на срок не более 1 года (с некоторыми ограничениями, установленными законом);
2) приведение в неподвижное состояние на срок не более 6 мес. одного или нескольких транспортных средств, принадлежащих осужденному;
3) конфискация одного или нескольких видов оружия, находящегося в распоряжении осужденного или имеющегося в его распоряжении;
4) отзыв разрешения на охоту с запретом запрашивать новое разрешение не более 1 года;
5) запрет выпускать в обращение чеки на срок не более 1 года, кроме тех, которые позволяют получать средства векселедателем в присутствии плательщика по переводному векселю или тех, которые удостоверены, либо пользоваться платежными картами;
6) конфискация того, что служило или предназначалось для совершения преступления, или того, что является его результатом (ст. 131-14 УК Франции) [9].

Наказание в виде штрафа не может быть назначено в совокупности с одним из наказаний, связанных с лишением свободы или ограничением прав, перечисленных в статье 131-14. Наказания, связанные с лишением свободы или ограничением прав, перечисленных в этой статье, могут быть вынесены в совокупности.

За все штрафы 5-го класса суд может назначить вместо него или вместе с ним наказание в виде штрафа-возмещения в порядке, предусмотренном статьей 131-8-1 УК Франции. В этом случае суд устанавливает максимальный размер штрафа, который не может превышать 1 500 евро (ст. 131-15-1 УК Франции).

Кроме того, по УК Франции за нарушение физическому лицу могут быть назначены одно или несколько дополнительных наказаний. Их перечень дается в ст. 131-17 УК Франции. Например: приостановление действия водительских прав на срок не более 3 лет; запрет на хранение или ношение оружия, подлежащего разрешению, на срок не более 3 лет; конфискация одного или нескольких видов оружия, находящегося в распоряжении осужденного или имеющегося в его распоряжении, и др.

Выводы

Подводя итог, считаем необходимым сделать определенные выводы.

Во-первых, в отличие от УК РФ, система наказаний для физических лиц по уголовному законодательству Франции включает в себя как бы три подсистемы, в зависимости от того, какое деяние совершено виновным – преступление (подсистема уголовных наказаний), проступок (подсистема исправительных наказаний) или нарушение (подсистема полицейских наказаний).

Во-вторых, наказания в соответствующих подсистемах располагаются, в отличие от УК РФ, от наиболее к наименее строгому. При этом вариативность в части основных наказаний широко представлена в отношении наказуемости проступков и нарушений. Что касается совершения преступлений, то здесь наблюдается достаточно консервативный подход законодателя – преступление по общему правилу предполагает назначение наказания в виде лишения свободы, варьируются лишь его сроки (допускается пожизненное лишение свободы). Наказания за проступки в основном отдаются на усмотрение суда, т. е. они не предусмотрены в санкциях статей, но могут быть назначены судом вместо тюремного заключения (например, домашний арест под электронным наблюдением, штраф). По сравнению с первоначальной редакцией уголовного закона обнаруживается расширение перечней наказаний за проступки и за нарушения, дополнение их наказаниями, связанными с возмещением ущерба, а также иными наказаниями, не связанными с лишением свободы.

В-третьих, в УК Франции, в отличие от отечественного уголовного закона, наблюдается существенное разнообразие наказаний, которые могут назначаться вместо лишения свободы

или наряду с ним. Суду предоставлены широкие возможности индивидуализации наказания за счет наполнения УК Франции целым рядом наказаний, связанных с лишением или ограничением тех или иных прав осужденных, затрагивающих самые разные сферы человеческой деятельности. Особое внимание заслуживает дополнение УК Франции такими видами наказаний, как стажировка – прохождение обучающих курсов, в том числе курса гражданства, направленного на изучение ценностей республики и обязанностей гражданина, а также возмещение ущерба. Думается, что, введя стажировку, законодатель тем самым среагировал на те процессы, которые сегодня происходят во всем мире, в том числе и во французском обществе – снижение уровня воспитания, правовой нигилизм, отсутствие идеологии, пренебрежительное отношение к правам и свободам других лиц. Возмещение же ущерба наиболее соответствует тем целям наказания, которые определены в ст. 130-1 УК Франции, в частности, восстановление социального равновесия в соответствии с интересами потерпевшего. Не секрет, что, к сожалению, в России в последние годы наблюдается существенный «перекос» уголовного законодательства в сторону учета интересов осужденных – это и дополнение перечня наказаний наказаниями, альтернативными лишению свободы, и включение новых видов освобождения от уголовной ответственности и наказания, а также расширение сферы применения ранее существовавших видов освобождения, и допущение возможности изменения категории преступлений судом и многие другие. При этом изменения, направленные на защиту интересов потерпевших, не столь существенные.

Завершая наше исследование, еще раз подчеркнем, что использование зарубежного опыта представляет определенный интерес для обеспечения эффективности отечественной системы уголовных наказаний. Так, безусловными достоинствами французского законодателя в этой части являются: дифференциация подсистем наказаний в зависимости от характера и степени общественной опасности содеянного; широкая вариативность наказаний, которые могут назначаться в качестве дополнительных, а также так называемых «смешанных»; максимальная регламентация на законодательном уровне сочетаемости наказаний; указание в приговоре суда наказаний, которые последуют в случае его неисполнения; дополнение УК Франции такими наказаниями, как испытание гражданства (стажировка) и возмещение ущерба потерпевшему.

Список литературы

1. Административная преюдиция в уголовном праве: казус Ильдара Дадина / Л. Головко, А. Коробеев, Н. Лопашенко [и др]. – Текст : непосредственный // Закон. – 2017. – № 2. – С. 21–29.

2. Подройкина, И. А. Преступления в сфере экономической деятельности: обзор изменений главы 22 УК РФ / И. А. Подройкина. – Текст : непосредственный // Общество: политика, экономика, право. – 2020. – № 10 (87). – С. 63–67.

3. Дуюнов, В. К. Уголовно-правовое воздействие в механизме обеспечения национальной безопасности / В. К. Дуюнов, Р. В. Закомолдин. – Москва : РИОР, 2020. – 244 с. – Текст : непосредственный.

4. Хилюта, В. В. Наказание и уголовно-правовое воздействие: поиск оптимальной модели противодействия преступности / В. В. Хилюта. – Текст : непосредственный // Российский журнал правовых исследований. – 2019. – Т. 6, № 3 (20). – С. 138–147.

5. Теохаров, А. К. Эффективность исполнения уголовного наказания / А. К. Теохаров, А. Я. Бондарь, Г. Батболд. – Текст : непосредственный // Вестник Югорского государственного университета. – 2021. – Вып. 4 (63). – С. 111–119.

6. Трунцевский, Ю. В. Цели наказания лишением свободы / Ю. В. Трунцевский. – Текст : непосредственный // Вестник Югорского государственного университета. – 2021. – Вып. 4 (63). – С. 120–125.

7. Подройкина, И. А. Концептуальные основы построения системы уголовных наказаний в России / И. А. Подройкина. – Москва : Юрлитинформ, 2018. – 384 с. – Текст : непосредственный.

8. Подройкина, И. А. Зарубежный опыт и преемственность при построении системы уголовных наказаний в России / И. А. Подройкина. – Текст : непосредственный // Бизнес. Образование. Право. – 2012. – № 4 (21). – С. 247–250.

9. Code pénal : (Dernière mise à jour des données de ce code 10.01.2022) // Legifrance. – URL: https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do;jsessionid=F59737B77919186B3E49F124E2F45459.tplgfr21s_1?cidTexte=LEGITEXT000006070719&dateTexte=20190730 (date de la requête: 10.01.2022).

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 г. Выпуск 1 (64). С. 205–211

УДК 343.237
DOI: 10.18822/byusu202201205-211

ИНСТИТУТ СОУЧАСТИЯ В СВЕТЕ ЗАКОНОДАТЕЛЬНОЙ ТЕКСТОЛОГИИ

Ситникова Александра Ивановна
доктор юридических наук,
профессор кафедры уголовного права
Юго-Западного государственного университета
Курск, Россия
E-mail: orcrimpravo@yandtx.ru

В статье предпринята попытка рассмотреть институт соучастия с новых позиций, основанных на положениях законодательной текстологии. С позиций данного подхода при исследовании уголовно-правовых предписаний главы 7 УК РФ выявлена двухуровневая структура нормативного текста института соучастия: поверхностный (конструктивный) и глубинный (концептуальный) уровни. В качестве концептуальной основы конструирования уголовно-правовых предписаний главы 7 УК РФ законодатель использовал теоретические положения двух концепций: концепцию акцессорной природы соучастия и индивидуальной ответственности соучастников преступления. Анализ конструктивного уровня позволил выявить элементы уголовно-правовых предписаний института соучастия, а также дал возможность по-новому интерпретировать нормативный текст.

Ключевые слова: институт соучастия, законодательно-текстологический подход, двухуровневая структура нормативного текста, ответственность соучастников преступления.

THE INSTITUTE OF COMPLICITY IN LIGHT LEGISLATIVE TEXTOLOGY

Alexandra I. Sitnikova
Doctor of Law Sciences,
Professor of the Department of Criminal Law,
Southwest State University
Kursk, Russia
E-mail: orcrimpravo@yandtx.ru

The article attempts to consider the institution of complicity from new positions based on the provisions of legislative textual theory. From the standpoint of this approach, when studying the criminal law prescriptions of Chapter 7 of the Criminal Code of the Russian Federation, a two-level structure of the normative text of the institute of complicity was revealed: superficial (constructive) and deep (conceptual) levels. As a conceptual basis for the construction of the criminal law prescriptions of Chapter 7 of the Criminal Code of the Russian Federation, the legislator used the theoretical provisions of two concepts: the concept of the accessory nature of complicity and the individual responsibility of the accomplices of the crime. The analysis of the constructive level made it possible to identify elements of the criminal law prescriptions of the institute of complicity, and also made it possible to interpret the normative text in a new way.

Keywords: the institute of complicity, the legislative-textual approach, the two-level structure of the normative text, the responsibility of the participants of the crime.

Введение

Актуальность законодательно-текстологического исследования уголовно-правовых предписаний института соучастия обусловлена наличием ряда аспектов соучастия в преступлении, которые остаются дискуссионными, не имеют однозначных решений, представляют сложность в теории и правоприменительной практике, поскольку институт соучастия аккумулирует в себе достоинства и недостатки концептуальных положений, образующих данный институт.

Предметом исследования выступает многоуровневая организация нормативного текста уголовно-правовых предписаний института соучастия в преступлении, которая включает в себя два уровня: поверхностный (конструктивный) и глубинный (концептуальный) уровни.

Целью исследования является реализация возможностей текстологического подхода к конструированию уголовно-правовых предписаний, а также обеспечение их законодательно-текстологической интерпретации.

Методологической основой настоящего исследования являются такие методы познания, как дискурсивный, текстоцентрический. Дискурсивный метод даёт возможность рассмотреть уголовно-правовые предписания главы 7 УК РФ как совокупность уголовно-правовых (нормативных и научных) текстов. Текстоцентрический подход позволяет выделить признаки, характеризующие структурные особенности текстов уголовно-правовых предписаний.

В качестве задач исследования выступают проблемные ситуации, требующие разрешения, в том числе законодательно-текстологическое описание конструктивных особенностей нормативного текста о соучастии и разработка предложений по совершенствованию уголовно-правовых предписаний главы 7 УК РФ.

Научная новизна заключается в том, что в данной статье показан законодательно-текстологический подход к исследованию уголовно-правовых предписаний института соучастия, то есть представлена совокупность методов и теоретических положений, пригодных для конструирования и интерпретации нормативного текста о соучастии.

Основные результаты и выводы. 1. Институт соучастия в преступлении рассмотрен с законодательно-текстологических позиций, в результате чего выявлена двухуровневая организация нормативного текста. 2. В качестве концептуальной основы законодатель использовал теоретические положения комбинированной ответственности соучастников. 3. Анализ конструктивных особенностей предписаний о соучастии обусловил необходимость внесения предложений по изменению уголовно-правовых предписаний института соучастия.

Результаты и обсуждение

Применение уголовно-правовых норм, предусматривающих ответственность за соучастие в преступлении, вызывает на практике определённые трудности, так как используемые приёмы толкования не дают возможности выявить глубинный (концептуальный) уровень законодательных предписаний. В настоящей статье институт соучастия в преступлении рассмотрен с законодательно-текстологических позиций, дающих возможность интерпретировать нормы о соучастии в соответствии с законодательной интенцией.

Законодательно-текстологический подход к исследованию уголовно-правовых предписаний позволяет выделить двухуровневую структуру законодательного текста: поверхностный (конструктивный) и глубинный (концептуальный) уровни. При этом необходимо отметить, что оба уровня уголовно-правовых предписаний тесно взаимосвязаны друг с другом: концептуальный уровень аккумулирует доктринальные положения, лежащие в основе законодательного текста, а поверхностный (конструктивный) уровень представлен набором элементов, образующих уголовно-правовое предписание.

Концептуальный уровень нормативного текста. В качестве концептуальной основы уголовно-правовых предписаний института соучастия законодатель использовал теоретические положения комбинированной ответственности соучастников. Составными элементами комбинированной ответственности являются теоретические положения двух концепций: 1)

акцессорной природы соучастия; 2) индивидуальной ответственности соучастников. Впервые закрепление акцессорности соучастия было осуществлено законодателем в Уголовном кодексе Франции 1791 г. Дальнейшее развитие законодательные новеллы об акцессорной ответственности соучастников нашли отражение в кодексе Наполеона 1810 г. [10]. В немецкой уголовно-правовой доктрине концепция акцессорной ответственности фигурирует как общая теория соучастия [9], а в отечественной доктрине классического направления (представители Н. С. Таганцев, А. Жиряев, А. Кистяковский, А. Лохвицкий и другие классики) эта концепция представлена в качестве солидарной ответственности, в соответствии с которой профессор Н. С. Таганцев писал: «На этой общности вины покоится солидарная ответственность, каждого за всех и всех за каждого» [7, с. 338 и далее].

Согласно концепции акцессорной ответственности исполнитель признаётся главным соучастником, так как без исполнителя соучастие как таковое отсутствует. При таком подходе ответственность соучастников напрямую зависит от вида преступления, совершённого исполнителем в рамках общего преступного умысла.

Концепция индивидуальной ответственности соучастников разработана на основе положений о привлечении соучастников за лично совершённые преступные деяния в рамках общего преступного умысла [8, с. 172-173] и в соответствии с предписанием, сформулированным в ч. 1 ст. 34 УК РФ, зависит от характера и степени участия в совместно совершённом преступлении.

В современной уголовно-правовой литературе высказываются критические взгляды в отношении акцессорной природы соучастия. Так, Л. Д. Гаухман критикует позицию законодателя за фактическое отождествление ответственности соучастников с ответственностью исполнителя [1, с. 226]. Л. Д. Ермакова отрицает акцессорность соучастия для устранения зависимости ответственности соучастников от совершённого исполнителем вида преступления [2, с. 19]. Негативное отношение к акцессорности соучастия указанный автор связывает с тем, что использование законодателем акцессорной концепции соучастия минимально, поскольку большая часть уголовно-правовых предписаний сформулирована на концептуальных основах самостоятельной природы ответственности за преступления, совершённые в соучастии [2, с. 23]. Авторы учебных курсов по уголовному праву вполне обоснованно признают, что совершение групповых преступлений не вписывается в теорию акцессорности [3, с. 431; 4, с. 296].

Сторонники индивидуальной ответственности соучастников считают бесспорным тот факт, что ответственность каждого соучастника имеет самостоятельный и строго индивидуальный характер [5, с. 300; 6, с. 170-171]. Правоприменительная практика подтверждает теоретическое положение о необходимости сугубо индивидуальной ответственности соучастников, так как мотивы криминальных действий организаторов, подстрекателей и пособников в большинстве случаев не совпадают с преступными мотивами исполнителей. К тому же объективная сторона их действий либо бездействия существенно отличается от преступного деяния, совершаемого исполнителем, так как эти лица выполняют функции организатора, подстрекателя или пособника, а исполнитель непосредственно реализует общий преступный умысел. В тех случаях, когда лицо совершает преступление посредством лиц, не подлежащих уголовной ответственности, соучастие как таковое отсутствует, и к уголовной ответственности в качестве посредственного исполнителя привлекается лицо, обладающее признаками надлежащего субъекта.

Концептуальный (глубинный) уровень акцессорной ответственности соучастников достаточно наглядно проявляется в части 5 ст. 34 УК РФ. Данное предписание гласит: «в случае недоведения исполнителем преступления до конца по не зависящим от него обстоятельствам остальные соучастники несут уголовную ответственность за приготовление к преступлению или покушение на преступление». Концептуальные положения об индивидуальной ответственности соучастников в развёрнутом виде закреплены в ч. 1 ст. 34 УК РФ. Кроме того, принцип индивидуальной ответственности законодатель подтвердил и в ч. 1 ст. 67 УК

РФ, в которой признал необходимым назначать наказание с учётом характера и степени фактического участия каждого соучастника в совершении преступного деяния.

Поверхностный (конструктивный) уровень. Законодательно-текстологический подход позволяет рассмотреть конструктивный уровень предписаний о соучастии в преступлении с новых позиций. Законодательно-текстологический анализ показывает следующее:

1. В ст. 32 УК РФ сформулирована дефиниция соучастия, конструктивными признаками которой являются тематический компонент – «соучастие в преступлении» и дескриптивные признаки, раскрывающие понятие соучастия: субъективный признак, характеризующий умышленную форму вины при совместном совершении умышленного преступления, и количественный признак – «участие двух и более лиц». Однако количественный признак не содержит указания на возможность признания соучастниками только лиц, обладающих признаками субъекта преступления, несмотря на то, что среди индивидов, участвующих в совершении противозаконного деяния, могут находиться лица, не подлежащие уголовной ответственности в силу возраста, невменяемости и других обстоятельств. В этой связи, на наш взгляд, следует внести уточнение в количественный признак соучастия, такой как «участие двух и более лиц, *подлежащих уголовной ответственности*». При этом ст. 32 УК РФ желательно дополнить примечанием, согласно которому соучастие отсутствует при наличии в группе лиц, не подлежащих уголовной ответственности.

2. В ст. 34 УК РФ законодатель закрепил несколько предписаний, включив их в статью под названием «Ответственность соучастников преступления». Законодательно-текстологический подход позволяет отметить следующие нюансы данных предписаний:

- во-первых, в ч. 1 ст. 34 УК РФ сформулировано законоположение об индивидуальной ответственности соучастников. Указанное предписание выражает устремление законодателя представить новеллу от ответственности соучастников, соответствующую смысловой и интегративной функциям заголовка ст. 34 УК РФ «Ответственность соучастников преступления»;
- во-вторых, в ч. 2, 3 ст. 34 УК РФ законодатель фактически описал правила оформления квалификационной записи действий соисполнителей, организаторов, подстрекателей и пособников путем указания, по каким статьям Общей и Особенной частей Кодекса отвечают указанные лица:
- в-третьих, предписания ч. 4 ст. 34 УК РФ признают возможность привлечения общего субъекта, участвующего в совместном совершении умышленного преступления со специальным субъектом, организатором, подстрекателем или пособником в зависимости от выполняемой им роли;
- в-четвёртых, в ч. 5 ст. 34 УК РФ законодатель соединил два предписания: первое предусматривает уголовную ответственность организатора, подстрекателя или пособника за приготовление или покушение при недоведении исполнителем преступления до конца в силу не зависящих от него обстоятельств; второе предписание содержит новеллу об ответственности подстрекателя, которому не удалось склонить других лиц к совершению преступления. С позиций законодательной текстологии законодатель применил неоправданный технический прием, так как указанные предписания требуют дифференциации, поскольку вынужденное недоведение исполнителем преступления до конца существенно отличается от неудавшегося подстрекательства.

3. Статью 35 УК РФ законодатель озаглавил как «Совершение преступления группой лиц, группой лиц по предварительному сговору, организованной группой или преступным сообществом (преступной организацией)». Теоретические положения законодательной текстологии дают возможность выявить отступление законодателя от конструирования качественного нормативного текста. О неудачном объединении нескольких предписаний в ст. 35 УК РФ свидетельствует объединение в рамках одной статьи разных по степени общественной опасности групповых преступлений:

1) части 1, 2, 3, 4 данной статьи фактически содержат предписания о соучастии, в которых сформулированы новеллы о формах соучастия, известных доктрине отечественного уголовного права;
2) в части 5 данной статьи сформулированы два предписания об уголовной ответственности: во-первых, организатора и руководителя, организовавших и (или) руководивших преступными действиями, предусмотренными ст. 205.4, 208, 209, 210, 282.11 УК РФ, а также совершивших преступление в рамках общего преступного умысла; во-вторых, других участников организованной группы или преступного сообщества (преступной организации) за преступления, составы которых обрисованы в ст. 205.4, 208, 209, 210, 282.1 УК РФ, а также за преступления, в подготовке или совершении которых они участвовали;
3) часть 6 ст. 35 УК РФ предусматривает привлечение к уголовной ответственности организатора за создание организованной группы в случаях, не заявленных статьями Особенной части уголовного закона, в виде приготовления к совершению организованной группой преступного деяния;
4) в части 7 ст. 35 УК РФ вполне справедливо сформулировано предписание о назначении более строгого наказания лицам, совершившим преступление организованно-групповыми способами.

На наш взгляд, уголовно-правовые предписания, содержащиеся в ч. 5, 6, 7 ст. 35 УК РФ, необходимо переместить в другие статьи: в частности, части 5 и 6 данной статьи по содержанию нормативных установлений необходимо включить в ст. 34 УК РФ, содержание которой посвящено уголовной ответственности соучастников преступления, а ч. 7 ст. 35 УК РФ – в ст. 67 УК РФ «Назначение наказания за преступление, совершённое в соучастии».

4. Норма об эксцессе исполнителя преступления сформулирована в ст. 36 УК РФ. Данная статья содержит два недифференцированных предписания: о понятии эксцесса и об исключении уголовной ответственности соучастников в случае совершения эксцессивных действий исполнителем. Следует отметить, что законодательная формула эксцесса исполнителя не в полной мере отражает достижения отечественной доктрины уголовного права, содержащие теоретические положения об эксцессе и его дифференциации на качественный и количественный виды. В этой связи представляется необходимым ввести в формулу эксцесса деление на виды и сформулировать понятие эксцесса следующим образом:

Эксцессом исполнителя преступления признаётся выход исполнителя за рамки общего преступного умысла, то есть совершение им качественно иного или более тяжкого преступления [6, с. 179].

5. Институт соучастия, содержащийся в главе 7 УК РФ, не может быть признан полным без рассмотрения норм о правовых последствиях добровольного отказа соучастников от доведения преступления до конца исполнителем. Уголовно-правовое предписание об этом содержится в ч. 4 ст. 31 УК РФ «Неоконченное преступление».

В ч. 4 ст. 31 УК РФ законодатель закрепил правовые последствия добровольного отказа организатора, подстрекателя и пособника в виде исключения возможности их привлечения к уголовной ответственности. В отношении организатора и подстрекателя указаны конкретные действия, необходимые для предотвращения совершения исполнителем преступления до конца, в том числе своевременное сообщение органам власти о готовящемся преступлении либо принятие иных мер по пресечению преступных действий исполнителем. Для пособника законодатель сформулировал привилегированное законоположение, которое позволяет не привлекать его к уголовной ответственности за предпринятие всех зависящих от него мер.

Новелла, содержащаяся в ч. 5 ст. 31 УК РФ, фактически является обстоятельством, смягчающим наказание организатора и подстрекателя, если их действия не привели к предотвращению совершения преступления исполнителем.

Авторский взгляд на добровольный отказ соучастников. Ранее нами был предложен проект статьи о правовых последствиях добровольного отказа соучастников от преступления [6, с. 179-180].

Законодательно-текстологическая интерпретация предлагаемых новелл позволяет сделать следующие выводы:

1) в части первой предлагаемой статьи уточнены условия исключения уголовной ответственности исполнителя при наличии у него доброй воли прекратить совершение преступления;
2) часть вторая статьи предписывает привлечение других соучастников к уголовной ответственности за покушение на преступление, от доведения которого добровольно отказался исполнитель. В основу квалификации действий соучастников в качестве покушения на преступление использованы следующие законодательные и теоретические разработки: во-первых, законодатель обязывает дать уголовно-правовую оценку действий соучастников на основе учёта характера и степени фактического участия каждого из них в совершении преступления; во-вторых, действия соучастников при добровольном отказе исполнителя носят оконченный характер, так как организатор совершил действия, указанные в ст. 33 УК РФ, подстрекатель совершил действия, необходимые для того, чтобы вызвать решимость у исполнителя совершить преступление, пособник заверил исполнителя в оказании необходимой помощи для совершения и завершения преступления, но общий умысел не был реализован лишь в силу добровольного отказа исполнителя; в-третьих, согласно классической теории покушения оконченные преступные действия при отсутствии замышляемого преступного результата следует квалифицировать как оконченное покушение;
3) часть третья предлагаемой статьи формулирует для всех соучастников равный характер совершаемых действий, свидетельствующих об их добровольном отказе от совершения преступления. При этом изъято закреплённое законодателем привилегированное положение пособника, действия которого направлены на пресечение преступления исполнителем;
4) в части четвёртой проекта сформулировано положение о привлечении исполнителя к уголовной ответственности в случае добровольного отказа от преступления других соучастников. При квалификации действий исполнителя учитывается степень завершённости преступления;
5) часть пятая предлагаемой статьи предоставляет право правоприменителю признать предпринятые меры для пресечения преступления исполнителем как смягчающее обстоятельство для соучастников.

Обращает на себя внимание, что нормативное предписание, сформулированное законодателем в ч. 4 ст. 31 УК РФ, нарушает структурную организацию уголовно-правовых предписаний главы 6 «Неоконченное преступление» и главы 7 «Соучастие в преступлении», поскольку предписание об особенностях ответственности организатора, подстрекателя и пособника в случае прекращения преступных действий по своей доброй воле является нецелесообразным. Ранее сотрудники ИГПАН СССР, разработавшие Теоретическую модель УК РФ в 1987 г., признали необходимым дополнить институт соучастия предписаниями о добровольном отказе соучастников. Однако в 1996 г. законодатель не воспринял данную разработку, что привело к нарушению структурных связей в рамках обоих институтов, минимизации нормативно-текстового единства предписаний и целевой заданности профилактического потенциала норм о добровольном отказе соучастников.

Заключение и выводы

В заключение необходимо отметить, что в качестве основы конструирования уголовно-правовых предписаний института соучастия законодатель использовал теоретические положения двух концепций: об акцессорной природе соучастия и индивидуальной ответственности соучастников. Анализ конструктивного уровня предписаний главы 7 УК РФ дал возможность сформулировать выводные положения, реализация которых позволит улучшить качество уголовно-правовых предписаний о соучастии в преступлении. О практической значимости представленной статьи свидетельствуют высказанные предложения, направленные на улучшение качества нормативного текста о соучастии, в частности, о внесении уточнения в

количественный признак соучастия путём указания на возможность признания соучастниками только лиц, обладающих признаками субъекта преступления; об изменении дефиниции эксцесса за счёт введения в формулу двух видов эксцесса: качественного и количественного; о необходимости введения в институт соучастия норм о правовых последствиях добровольного отказа соучастников при недоведении исполнителем преступления до конца. В качестве перспективного направления дальнейшего исследования нормативного текста института соучастия является дальнейшая разработка теоретических положений института соучастия в преступлении с позиций законодательной текстологии.

Список литературы

1. Гаухман, Л. Д. Квалификация преступлений: закон, теория, практика / Л. Д. Гаухман. – Москва : Центр Юринформ, 2001. – 316 с. – Текст : непосредственный.
2. Ермакова, Л. Д. Понятие соучастия / Л. Д. Ермакова. – Текст : непосредственный // Энциклопедия уголовного права : в 32 томах. Том 6: Соучастие в преступлении. – Санкт-Петербург, 2007. – С. 3–122.
3. Курс уголовного права. Общая часть : в 5 томах. Том 1: Учение о преступлении / под редакцией Н. Ф. Кузнецовой, И. М. Тяжковой. – Москва : Зерцало,1999. – 592 с. – Текст : непосредственный.
4. Уголовное право России. Общая часть / под редакцией А. И. Рарога. – Москва : Эксмо, 2009. – 496 с. – Текст : непосредственный.
5. Наумов, А. В. Российское уголовное право. Общая часть : курс лекций / А. В. Наумов. – Москва : Бек, 1996. – 560 с. – Текст : непосредственный.
6. Ситникова, А. И. Уголовно-правовая текстология : монография / А. И. Ситникова. – Москва : Проспект,2016. – 304 с. – Текст : непосредственный.
7. Таганцев, Н. С. Русское уголовное право. Общая часть : в 2 томах / Н. С. Таганцев. – Москва : Наука, 1994. – Т. 1. – 393 с. – Текст : непосредственный.
8. Трайнин, А. Н. Учение о соучастии / А. Н. Трайнин. – Москва : НКЮ СССР, 1941. – 160 с. – Текст : непосредственный.
9. Muller, C. F. Strafrecht. Allgemeiner Teil. Die Straftat und ihr Aufbau / C. F. Muller. – 38 Auflage. – Heidelberg : C.F. Muller Verlag, 2008 – 386 s.
10. Code Penal. – Paris : DE L’ IMPRIMERIE IMPERIALE, 1810. – 300 p.

ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ И ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБЛЕМ ОБРАЗОВАНИЯ

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 г. Выпуск 1 (64). С. 215–225

УДК 372.8
DOI: 10.18822/byusu202201215-225

РЕФЛЕКСИВНОЕ ЭССЕ О МУЗЫКАЛЬНОМ ПРОИЗВЕДЕНИИ КАК СПОСОБ РАЗВИТИЯ ТВОРЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА УЧАЩИХСЯ

Гильманов Сергей Амирович
доктор педагогических наук,
профессор Гуманитарного института
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: gsa1109@yandex.ru

Зеленая Алина Викторовна
аспирант Гуманитарного института
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: zav10@mail.ru

*Предметом исследования является влияние написания рефлексивного эссе о прослушанном музыкальном произведении на развитие творческого потенциала личности. Цель – теоретическое обоснование возможности развития творческого потенциала личности при написании рефлексивных эссе и эмпирическое подтверждение предложенного подхода на основе данных пилотажного исследования, проведенного в детской школе искусств г. Ханты-Мансийска (*n*=22). Теоретическими методами исследования явились анализ, обобщение, систематизация. Эмпирические методы: эксперимент, тестирование, качественный анализ текстов эссе исследуемых.*

Авторы проводят краткий анализ методов определения уровня творческого потенциала и обосновывают возможность использования метода опроса. Описаны условия, которые нужно соблюдать при подборе произведений и написании эссе. Приведены доводы в пользу того, что написание эссе не является интерпретацией музыкального произведения, а само прослушивание произведения не является частью психотерапевтических методов. Изложены результаты пилотажного исследования, которые с определенной вероятностью говорят о том, что написание эссе оказало влияние на развитие творческого потенциала исследуемых.

Ключевые слова: творческий потенциал, рефлексивное эссе, музыкальное произведение.

REFLEXIVE ESSAY ABOUT A PIECE OF MUSIC AS A WAY TO DEVELOP THE CREATIVE POTENTIAL OF STUDENTS

Sergey A. Gilmanov
Doctor of Pedagogical Sciences,
Professor of the Humanitarian Institute,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: gsa1109@yandex.ru

Alina V. Zelenaya
Postgraduate Student of the Humanitarian Institute,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: zav10@mail.ru

The subject of the study is the influence of writing a reflexive essay about a listened piece of music on the development of a person's creative potential. The purpose is a theoretical substantiation of the possibility of developing the creative potential of a person when writing reflexive essays and empirical confirmation of the proposed approach based on data from a pilot study conducted at the Children's art school in Khanty-Mansiysk (n=22). The theoretical methods of research were analysis, generalization, systematization. Empirical methods: experiment, testing, qualitative analysis of the texts of the essays of the investigated.

The authors conduct a brief analysis of methods for determining the level of creative potential and justify the possibility of using the survey method. The conditions that must be observed when selecting works and writing essays are described. Arguments are given in favor of the fact that writing an essay is not an interpretation of a musical work, and listening to the work itself is not part of psychotherapeutic methods. The results of the pilot study are presented, which with a certain probability indicate that the writing of the essay had an impact on the development of the creative potential of the person.

Keywords: creative potential, reflective essay, musical composition.

Введение

Творческий потенциал – важнейшее качество личности, являющееся общей основой успешности творчества в любом виде деятельности и характеризующее общую вероятность эффективного саморазвития и самореализации человека в самых разных жизненных обстоятельствах. Именно поэтому творческий потенциал в последние десятилетия все более активно исследуется в отечественной и зарубежной психолого-педагогической науке. Предложены определения его сущности, структурных компонентов, способов развития и диагностики (В. И. Андреев, Б. Барбот, В. Безансон, Е. В. Бондаревская, Л. К. Веретенникова, Л. А. Даринская, Л. Я. Дорфман, О. Ю. Козинская, Т. Любарт, Т. И. Миронова, Дж. С. Рензулли, З. В. Румянцева, С. В. Шепелева, В. С. Шубинский и др.). Мы на основании анализа работ специалистов считаем, что творческий потенциал можно определить как качество личности, включающее интеллектуальные (творческое образное мышление; творческое воображение; способность абстрагироваться; зрительная и слуховая память), эмоционально-волевые (уровень эмпатии; способность переживать воодушевление, инсайтные эмоции; способность сохранять сосредоточенность на решении задачи; готовность к самовоздействию), психофизиологические (общие функциональные свойства: утомляемость стрессоустойчивость и помехоустойчивость, пластичность, переключаемость) компоненты и имеющее такие свойства, как латентность (творческий потенциал часто не осознается самим человеком), целостность (все его компоненты взаимосвязаны), динамичность (творческий потенциал может развиваться или уменьшаться).

Исследователями предложены теоретические и эмпирические подходы к способам развития творческих качеств, в том числе и творческого потенциала (В. И. Андреев, Е. В. Бондаревская, Л. К. Веретенникова, Л. А. Даринская, В. С. Шубинский и др.), причем многие педагоги и психологи указывают на то, что эффективно развивать творческие качества (включая и творческий потенциал) личности можно на основе обращения к искусству, особенно музыкальному, в том числе на основе музыкально-слуховой деятельности (Э. Б. Абдуллин, В. М. Авдеев, С. Н. Беляева-Экземплярская, Л. Л. Бочкарев, А. Л. Готсдинер, Г. Н. Кечхуашвили, А. Г. Костюк, Е. В. Назайкинский, Е. В. Николаева, В. Д. Остроменский, В. Н.

Тавхелидзе, Г. С. Тарасов, В. М. Цеханский и др.). Однако малоисследованным остается такой способ развития творческого потенциала, как обращение к описанию человеком собственных переживаний, возникших при взаимодействии с художественным произведением, интерпретации, выраженной в создании собственного творческого продукта (рисунке, тексте и т. д.). Мы считаем, что рефлексивные размышления о своих впечатлениях, ощущениях (всех модальностей), мыслях, эмоциях являются эффективным средством повышения творческого потенциала личности, так как такие размышления охватывают все компоненты в их целостности, а создание творческого продукта, содержащего оформленную интерпретацию переживаний, помогает осознать границы и направления развития своего творческого потенциала.

В данной статье мы на основе анализа теоретических подходов, накопленных в психолого-педагогической науке, обосновываем возможность развития творческого потенциала личности при написании рефлексивных эссе о прослушанных музыкальных произведениях и описываем пилотажное (полное экспериментальное доказательство эффективности предлагаемого подхода еще предстоит выполнить) эмпирическое исследование, в котором реализован предлагаемый нами способ. Для достижения данной цели требуется: установить и обосновать требования к музыкальным произведениям, прослушивание которых делает возможным использование музыки как способа развития творческого потенциала личности; подобрать диагностический инструментарий, позволяющий определить признаки творческого потенциала и установить эффективность написания рефлексивных эссе и провести эмпирическую проверку предлагаемого подхода.

Результаты и обсуждение

Целенаправленное развитие творческого потенциала связано, на наш взгляд, не только с прямым воздействием на психические процессы и состояния человека (мотивация, интеллект, эмоционально-волевая сфера и пр.), но и с созданием определенных ситуаций, в которых действует достаточно мощный стимул или совокупность стимулов, комплексно влияющих на все стороны и структурные уровни личности, которое актуализирует позицию рефлексивного отражения собственных впечатлений от воздействия этих стимулов в вербально выраженном продукте: эссе, стихотворении и т. д. Совокупность стимулов заложена, по нашему мнению, в произведении искусства: оно само существует для организации смысловых и чувственных переживаний человека в единую систему. Музыка обладает здесь среди других видов искусства уникальными преимуществами: при взаимодействии с ней человек включается в активное следование звучащему музыкальному тексту, осуществляет чувственное, интеллектуальное, эмоциональное, смысловое отражение содержания и формы музыкального произведения. При создании текста, в котором описываются впечатления от музыкального произведения, человек должен задействовать личностный опыт в целом, актуализировать ценностные ориентации, проявлять творческую активность, связанную с созданием оформленного продукта, осуществлять самовоздействие для извлечения потенциалов собственной личности, обнаруживать возможности, о которых он сам может и не подозревать. При вербализации чувственных впечатлений от музыки в логически оформленном тексте повышается целостность интеллектуальной деятельности, что связно с актуализирующимися элементами жизненного опыта. Это обусловливает преодоление относительной «независимости» в развитии проявлений разных видов интеллекта. Отмечая независимость в развитии вербального, формально-логического и пространственного интеллекта, В. Н. Дружинин говорил о речевом, пространственном, формально-знаковом кодах и о том, что «каждый новый «код» базируется на предыдущих: вербальный – на поведенческом, пространственный – на поведенческом и вербальном» [1, с. 259].

Поэтому одним из многочисленных педагогических способов развития творческого потенциала и может быть, на наш взгляд, написание эссе непосредственно после взаимодей-

ствия с музыкальным произведением. Для того, чтобы эти действия были направлены именно на развитие творческого потенциала, нужно, как мы считаем, соблюдать ряд условий:

- в произведении должно быть в определенной мере осуществлено моделирование эмоциональных состояний и психических процессов, которые отражают жизненные переживания человеческого «я»; оно должно позволять порождать ассоциации, пробуждать воспоминания, искать вербальное выражение переживания, конструируя конкретный текст;
- в произведении должна быть заложена положительная эмоциональная составляющая, включающая достаточно четкие «намеки» на конкретные основные эмоции и эмоциональные состояния человека («взволнованно», «лирично», «мечтательно», «вдохновенно», «поэтично» и т. п.) и позволяющая актуализировать ассоциации с социальной сферой («торжественно», «возвышенно», «элегантно» и т. п.);
- «язык» произведения должен быть понятым, форма гармоничной, исполнение безупречным; произведение должно строиться на знакомых ладовых, ритмических, тембровых основах для того, чтобы не затрачивались усилия по опознанию его содержания и формы; произведение должно обладать способностью вызывать чувственный отклик, иметь хорошо структурированный текст и предоставлять возможность смыслового толкования;
- длительность произведения должна быть такой, чтобы слушатель имел возможность мысленно «охватить» его;
- формулировка задания по написанию эссе должна быть достаточно неопределенной, оставляя человеку свободу в выборе содержания эссе.

Условие, касающееся положительной эмоциональной составляющей, введено нами из тех соображений, что содержание музыки, которое может быть «прочитано» как грустное или даже трагическое, может ингибировать мыслительные и эмоциональные процессы. В подтверждение этого можно сослаться на эмпирическое исследование С. Завойского, С. Тэйлора и Р. С. Фридмана, в котором показано, что люди «могут чувствовать себя хуже после прослушивания грустной музыки» [2, p. 247]. Условие, касающееся неопределенности задания к написанию эссе, связано в первую очередь с необходимостью стимулировать творческое мышление. Дж. С. Рензулли в качестве базовых принципов, запускающих творческую деятельность, называет нацеленность на развитие дивергентного мышления, создание в классной комнате атмосферы, поддерживающей творческое мышление и становление учителя способным к творческому акту преподавания [3, pp. 23-25]. При написании эссе мы как минимум «включаем» действие первых двух принципов.

Важно и то, в какой ситуации проводятся прослушивание и написание эссе. Не должно быть отвлекающих и тревожащих факторов, психическое состояние пишущих эссе должно быть спокойным, воспроизведение звучания – качественным.

Таким образом, психолого-педагогический потенциал обращения к личностному опыту в вербализации переживаний по поводу обращения к музыкальному произведению как оформленному явлению культуры, имеющему эмоциональное содержание, форму, задающую определенный порядок прослушивания, в том, что следование содержанию и форме произведения приковывает внимание слушателя, актуализирует его воображение, мышление, эмоции, а последующее обращение в эссе к содержанию собственного опыта переживания произведения служит способом «встречи с собой».

Предлагаемый нами подход отличается от рецептивной формы музыкальной терапии, которая предполагает пассивную позицию пациента, концентрирующего внимание только на звучании музыки, и должна облегчить его состояние. Психотерапевты особо подчеркивают, что музыка «эффективно снимает тревогу и улучшает настроение», «улучшает качество жизни пациентов, получающих паллиативную помощь, усиливая чувство комфорта и расслабления» [4, p. 282].

Активность предлагаемого нами способа взаимодействия с музыкой – в обращении не к интерпретации произведения, а к собственному внутреннему миру, пробужденному и в процессе взаимодействия с произведением, и рефлексивной его вербализации, когда происходит оформление текста эссе. Здесь человек не интерпретирует исполнение и жанровые характеристики произведения. В интерпретации анализируются и оцениваются произведения и их исполнение, в ней требуется позиция эксперта, где непосредственность восприятия, стимулируемая и питаемая живым художественным воображением, одновременно требует таких умений и знаний, как «оснащенность эксперта в области истории и теории исполнительства, отточенность аналитических технологий, мастерства, концептуальная основа общих и частных научно-логических построений, обоснований» [5, с. 25]. Конечно, для общего художественного развития весьма важно также развивать способности и умения погружаться в художественный мир музыки, которые обеспечивают «переосмысление образного языка музыки, переведение его в художественно-эстетическую плоскость» [6, с. 29]. Для целей же нашего исследования требуется стимулирование рефлексивной позиции, когда музыка играет роль комплексного стимула в процессе непосредственного взаимодействия с произведением.

Отличается наш подход и от метода свободных ассоциаций, применяемого в психотерапии (как, впрочем, и в психиатрии, социологии, психолингвистике и др.), т. к. эссе не служит здесь средством выявления психологических проблем исследуемых, не имеет цели подобрать какую-либо коммуникативную технику влияния на них, а само по себе направлено на стимулирование самопознания личностных качеств. Слушатель здесь имеет дело с обращением к собственной чувственности, в которой в ходе слушания происходит отклик на «посылы», заложенные в произведении. Благодаря интуитивному владению «языком», на котором создано произведение (ладовое чувство, понимание невербального синтаксиса музыкальной речи, чувственный отклик на ритмические и тембровые свойства звучания и др.), человек может актуализировать опыт осмысления своего чувственного репертуара, пробуждать ассоциации, стимулировать активизацию творческих качеств. Обращение к анализу собственных переживаний и создание текста, передающего эти переживания, позволяет назвать такое эссе рефлексивным.

Конечно, в содержание психолого-педагогической диагностики творческого потенциала следует включать не только собственно эмпирические (тестовые, опросные, обсервационные) методы оценки уровня и целостности творческих качеств всех сторон личности, гармоничность и согласованность их функционирования, но и интерпретационные, качественные методы, позволяющие определить глубину и широту возможностей реализации творческого потенциала в различных контекстных условиях.

В психолого-педагогической науке предложены некоторые методы психодиагностики творческого потенциала. Так, Г. И. Железовская, Н. В. Абрамова, Е. Н. Гудкова предлагают использовать совокупность данных теста творческого мышления П. Торренса, опросника креативности Д. Джонсона, теста самооценки творческих способностей Е. Туник [7]. В эмпирическом исследовании творческого потенциала студентов А. А. Кузнецова в качестве психодиагностического инструментария использует методику диагностики мотивационной структуры личности (В. Э. Мильман); опросник «Определение типов мышления и уровня креативности» Дж. Брунера; методику Г. Дэвиса (определения творческих способностей) [8]. Т. Н. Виниченко и соавторы, включая в творческий потенциал такие компоненты, как интеллектуальный, коммуникативный, креативный, деятельностный, мотивационный, выделив критерии их оценивания, создали многофакторный тест-опросник, в котором измеряется каждый из компонентов [9].

Т. Любартом, В. Безансоном, Б. Барботом в 2011 г. создана психодиагностическая методика «Оценка творческого потенциала» (The Evaluation of Potential Creativity, EPoC), которая состоит из восьми подтестов, дающих четыре составных балла, измеряющих каждую «единицу предметной области мыслительного процесса», а именно:

– «Дивергентная графика» (DG) (например, предоставляется графическая форма, и ребенок должен сделать как можно больше рисунков, чтобы завершить форму);

- «Интегративная графика» (IG) (например, предоставляется набор изображений объектов, и ребенок должен создать полный рисунок, используя по крайней мере четыре из восьми предоставленных объектов);
- «Дивергентная вербализация» (DV) (например, создать много окончаний к началу истории);
- «Интегративная вербализация (IV) (например, создать полную историю на основе описаний нескольких вымышленных персонажей) [10, p. 6].

На основе EPoC авторы в эмпирических исследованиях определили шесть типичных профилей творческого потенциала детей, включая: (1) «Высокий потенциал» (высокие баллы по индексам EPoC); (2) «Низкий потенциал» (низкие баллы по индексам EPoC); (3) «Вербальный» (сильные стороны в вербальных задачах); (4) «Графический» (сильные стороны в графических задачах); (5) «Дивергентный» (сильные стороны в расходящихся задачах) и (6) «Интегративный» (сильные стороны в интегративные задачи). Предлагаются в зарубежной психологии и иные подходы к психодиагностике творческого потенциала. Например, С. В. Брито в исследовании развития творческого потенциала, проведенном на базе Португальского политехнического института, использует такие методы измерения и выявления творческого потенциала, как скрининговый опросник Херманна «Творческий мозг»; анкету портретных ценностей (PVQ) С. Х. Шварца; «Управленческую сетку» Р. Р. Блейка, Д. С. Мутон, Э. С. Бидвелла; «Стратегии изменения отношения» Дж. А. Алькантары [11]. Однако методики Блейка, Д. С. Мутон, Э. С. Бидвелла и Дж. А. Алькантары ориентированы на выявление творческого потенциала в предпринимательской деятельности, а не творческого потенциала как свойства личности. Поэтому для проведения пилотажного исследования мы решили ограничиться «суммирующим» подходом к диагностике творческого потенциала, составив на основе теста-опросника «Каков Ваш творческий потенциал» Е. И. Рогова [12, с. 15-17] опросник, в котором выявлялись намеченные нами признаки творческого потенциала: степень инициативности; границы любознательности; уровень творческого мышления; стремление быть независимым; степень сосредоточенности; уровень творческого воображения; постоянство; способность абстрагироваться; способность к самонаблюдению, умение оценивать себя; зрительную память; слуховую память; уровень эмпатии; гибкость, приспособляемость. Опросник состоит из 29-ти вопросов, формулировки которых были адаптированы к детской и подростковой аудитории.

В качестве пилотажного исследования мы в апреле–мае 2021 года на базе муниципального бюджетного учреждения дополнительного образования «Детская школа искусств» г. Ханты-Мансийска провели эмпирическое изучение развития творческого потенциала среди обучающихся. В исследовании приняли участие 22 учащихся музыкального отделения в возрасте 9-15 лет. Испытуемым предлагалось написать сочинения-впечатления («рефлексивные эссе») о прослушанной музыке. Предоставлялась полная свобода изложения, единственной установкой было «прислушаться к себе».

По итогам проведенного за две недели до написания эссе теста-опросника в совокупности исследованных были получены следующие результаты: 18 % обучающихся (4 человека) набрали 25-29 баллов; 64 % обучающихся (14 человек) набрали 18-24 балла; 18 % обучающихся (4 человека) набрали 17 и менее баллов.

Качественный анализ проводился нами для определения характера и широты отражения сенсорных, эмоциональных, изобразительных, сюжетных, формальных и смысловых характеристик, которые присутствуют в тексте эссе и могут служить признаками творческого потенциала. Единицами анализа были выбраны:

- характеристики модальности описания сенсорных проявлений (ощущения: кинетические, вкусовые, зрительные, слуховые, тактильные; конкретный образ, включающий комплекс сенсорных качеств);
- описание конкретных эмоций и общий эмоциональный фон (восторг, радость, печаль и пр., нейтральное в эмоциональном плане изложение);

- ситуационные характеристики (описание процесса, обстановки, жанровые сцены и пр.);
- динамичность сюжета (одномоментность описанного, изображение сценки, картины; описание динамически развивающихся ситуаций с изложением обстоятельств; наличие элементов сюжета с началом и завершением и пр.);
- оформленность текста эссе (есть введение, основная часть и завершение; есть кульминация и выделение основной мысли; форма не проявлена);
- вовлеченность автора эссе в описываемое, причастность к излагаемому (собственное участие в описанном; нет упоминания о себе и пр.);
- смысловые обобщения и общий смысл эссе (например: природа, общество, собственные чувства и пр.).

Чем полнее отражены в эссе эти элементы, тем выше, как мы считаем, уровень творческого потенциала автора: сенсорные, эмоциональные, ценностные и смысловые характеристики, оформленность сюжета, самого текста и рефлексивность – свидетельства того, что у человека проявляется определенная целостность творческого потенциала, охватывающая ценностно-смысловые, мотивационные, интеллектуальные, эмоциональные, волевые, психофизиологические стороны личности. Конкретные, не вошедшие в число отобранных единицы качественного анализа выделялись нами только при рассмотрении всех полных текстов эссе и подлежали индивидуальной интерпретации.

Для прослушивания были отобраны следующие музыкальные произведения (композиции):

1) Бородин А. Хор «Улетай на крыльях ветра» из оперы «Князь Игорь» (вокал). Хронометраж – 2:40.
2) Хачатурян А. Вальс из сюиты «Маскарад» (оркестр). Хронометраж – 4:12.
3) Рахманинов С. В. «Весенние воды» (фортепиано – труба). Хронометраж – 2:15.
4) The Beatles – «Because» (вокал). Хронометраж – 2:30.
5) Пьяццолла А. «Либертанго» (инструментальный ансамбль; аккордеон). Хронометраж – 3:00.
6) Чернецкий С. А. Торжественный марш «Рокоссовский» (духовой оркестр). Хронометраж – 2:40.

Музыкальные композиции отбирались с соблюдением следующих требований: эмоциональное содержание должно содержать конкретный эмоциональный (например, «взволнованно»), социально интерпретируемый (например, «торжественно»), определенную лиричность, мечтательность (например, «поэтично») посылы; содержание и форма произведений должны быть достаточно просты и интуитивно понятны. Все отобранные нами композиции были сгруппированы на основе «Словаря эстетических оттенков эмоций», предложенных В. Г. Ражниковым [13, с. 136-140] в 3 группы: «поэтично» – музыкальные композиции № 1 и № 4; «взволнованно» – музыкальные композиции № 2 и № 5; «торжественно» – музыкальные композиции № 3 и № 6.

Каждое из произведений по форме и длительности вполне «обозримо» в представлении; в совокупности прослушивание всех произведений занимает 17 минут 17 секунд, что вполне позволяет сохранять внимание и интеллектуальную и эмоциональную активность.

Композиции воспроизводились на качественной в передаче акустических параметров аппаратуре, со средней громкостью, в присутствии всех участников. Авторы и названия произведений не назывались, мы обозначили их только по номерам композиций. После прослушивания каждого произведения учащимся предоставлялось время (не менее часа) для написания эссе. Прослушивание следующего произведения начиналось только после того, как все завершали написание эссе о прослушанном. Для сохранения впечатлений от произведений работа была организована в течение дня, с часовым перерывом после воспроизведения и написания эссе о трех произведениях. Общее время, затраченное на проведение этого этапа исследования, – 3 часа.

При анализе текстов выявилось незначительное количество эссе, где имеют место малосодержательные, хотя и включающие определение образы и метафоры тексты: «Скрипка. Хорошее настроение. Это весна ведёт историю про Русь» («Улетай на крыльях ветра» из оперы «Князь Игорь»); «Приход весны. Эта песня про приход весны. Характер: веселый» («Улетай на крыльях ветра» из оперы «Князь Игорь»); «Кто-то танцует вальс. Уверенно» (Хачатурян, А. Вальс из сюиты «Маскарад»); «Певцы поют, а гитаристы играют на гитаре» (The Beatles, «Because»).

Но у большинства обучающихся описания были более развернутыми, яркими, живописными, созвучными содержанию музыки. Ребята изображали в своих сочинениях поэтические образы («белые лебеди», «пение птиц», «журчание ручья, «пение ангелов» и т. д.), работы были наполнены абстрактными образами, описанием внутреннего мира человека (перечисление состояний, чувств, эмоций), жанровыми сценками (зарисовками). Порой испытуемые описывали в своих сочинениях нереальные образы: «Я знаю, что это марш, но в голову мне приходит совсем другая история… Как будто весь мир ожил в комнате маленького ребенка, малыша …».

В эссе, в которых творческий потенциал проявился, по нашему мнению, наиболее полно, наличествуют описания многообразных сенсорных проявлений, эмоций, ощущается общий эмоциональный фон, присутствуют ситуационные характеристики, заметна динамичность сюжета, смысловые обобщения, проявлена причастность автора к описываемому, текст оформлен. Приведем пример такого эссе (при цитировании эссе стилистика изложения полностью сохранена, редактированию подвергались только орфографические и пунктуационные ошибки).

«Поле с цветами, каких там только не было! Как сейчас помню это солнце, настолько яркое, что слепило глаза, а небо… небо было чистейшим, ни единого облачка на нём не было. Помню всё, как было тогда. Эти прекрасные журчащие ручьи отдавали золотым блеском. Неподалёку стоит деревушка. Я ходил на это поле, просто ложился на землю и смотрел в небо. В голове проносились прекрасные мелодии. Иногда из своей деревушки я слышал, как поют наши прекрасные девушки, а подпевают им наши парни. Я просто лежал и слушал песни наших девушек. Пели они настолько прекрасно, что мне казалось, что им подпевает сама природа. Вот так и запомнился мне мой родной край. Прекрасный край, который я никогда не забуду» (Бородин. Хор «Улетай на крыльях ветра» из оперы «Князь Игорь»).

Гораздо больше эссе, где присутствуют выраженные в зрительных образах ситуационные характеристики, чувствуется общий эмоциональный фон, смысловые обобщения, текст оформлен, но позиция автора и его причастность к описываемому не проявлены. Приведем несколько примеров таких эссе.

- «Я представляю, как пара белых лебедей начинает тихий спокойный танец, плавая по озеру. Постепенно поднимается солнце, и всё больше птиц просыпается. Другие лебеди, проснувшись, присоединяются к танцу, и танец становится всё энергичней, всё ярче. И вот просыпаются все другие птицы, и они парят, плавают, и музыка (танец) всё энергичней и ярче» (Бородин. Хор «Улетай на крыльях ветра» из оперы «Князь Игорь»);
- «Эта музыкальная композиция мне показалась яркой, солнечной и в то же время нежной, мягкой. Я увидела, как просыпается весна, а крестьяне поют и водят хороводы. Им начинают подпевать птицы. На деревьях появляются почки, вырастают цветы: ландыши, тюльпаны. Появляются земляника, клубника, малина» (Бородин А. Хор «Улетай на крыльях ветра» из оперы «Князь Игорь»);
- «Вначале эта музыка была тревожная, грозная, мощная. Но ближе к середине напряжение упало, и музыка резко стала загадочной. А после снова властной, мужественной. Мы попадаем будто бы на бал, и бал в самом разгаре. Пары кружатся под музыку. Звучат ударные – бал окончен» (Хачатурян А. Вальс из сюиты «Маскарад»);
- «Эта музыка очень радостная. Подходят различные темы. Например, звуки природы. Духовой инструмент обозначает пение птиц или величие деревьев. Клавишный инструмент может обозначать журчание ручья. Эта музыка может подходить романтичной истории. А также приходу героев после победы над врагом. Народ их радостно

встречает, и все счастливы. Также эта композиция может обозначать восход солнца» (Рахманинов. «Весенние воды»).

В некоторых эссе можно увидеть прежде всего «работу» ассоциирования:

– «Мне представляются люди в белых костюмах, они кружатся по всей сцене. Если посмотреть сверху, тогда можно представить, что люди – это ноты. Ноты в очень сердечной красивой музыке! Это так загадочно и мечтательно!» (Хачатурян. Вальс из сюиты «Маскарад»);
– «Показалось, что поют ангелы. Как будто я попала в рай, и там такое приветствие. Под эту песню я вспомнила все свои лучшие моменты и воспоминания» (The Beatles. «Because»);
– «Возможно, эта музыка передает переживания героя. Или этот герой торопится куда-то, опаздывает. Или музыка передает напряженный или переломный момент в жизни этого героя. В конце случается что-то похожее на провал. Или он спешит к своей любви. Сама музыка быстрая, целеустремленная, волнительная, резкая, энергичная» (Пьяццолла. «Либертанго»).

Эссе, в которых придуманы определенные сюжеты:

– «Я знаю, что это марш, но в голову мне приходит совсем другая история… Как будто весь мир ожил в комнате маленького ребенка, малыша. Все машинки заездили в такт этой мелодии. Все солдатики выстроились в ряд и готовы маршировать. Все игрушки, от самой маленькой до самой большой, празднично маршируют до своего места на полке. Мне эта мелодия напомнила мультфильм «Мойдодыр» (Чернецкий. Торжественный марш «Рококсовский»);
– «Музыка звучит торжественно, величественно, широко, ярко. Хочется под эту музыку маршировать и радоваться. История: огромное королевство празднует победу. Дети веселятся, смеются, шутят. Война прошла быстро, великое королевство показало свою мощь, и враг отступил. Больших потерь не было, поэтому народ радуется, что всё хорошо закончилось. Солдаты в красно-синих костюмах маршируют по огромной площади (17 век)» (Чернецкий. Торжественный марш «Рококсовский»).

Есть и эссе, в которых проявлены только оценочные и смысловые суждения:

– «На самом деле эта композиция очень сложна. Эта композиция содержит много характеров: тревожное настроение, величественное, иногда веселое и элегантное. Создается ощущение, будто я нахожусь на балу в каком-то замке. Эта музыка, казалось бы, очень легка для восприятия, и легко понять её настроение, но если прислушаться, то можно понять, что эта композиция не так проста, как кажется!» (Хачатурян. Вальс из сюиты «Маскарад»).

В целом по результатам качественного анализа эссе можно сказать, что именно наличие развернутых описаний многообразных сенсорных проявлений, эмоций, присутствие общего эмоционального фона, динамичности сюжета, смысловых обобщений, проявленность причастности автора к описываемому присущи тем участникам, которые продемонстрировали наиболее значительные сдвиги в проявлениях творческого потенциала. Оформленность текста говорит о широте возможностей авторов эссе при решении творческой задачи (авторы сами не только формулируют для себя цель, определяют содержание, создают текст, но и анализируют собственные переживания, обращаясь к жизненному опыту), при решении которой создается собственный продукт, что является несомненным свидетельством творческого потенциала.

Сразу после написания эссе учащимся был вновь предложен составленный нами опросник. Ответы на него показали: 27 % обучающихся (6 человек) набрали 25-29 баллов (увеличение на 9 %); 68,5 % обучающихся (15 человек) набрали 15-24 балла (увеличение на 4,5 %); 4,5 % (1 человек) набрал 14 и менее балла (уменьшение на 13,5 %). При этом те обучающиеся, которые при первом тестировании набрали наименьшее количество баллов (17 и менее), после прослушивания и написания эссе при повторном тестировании показали наибольшую

разницу в показателях творческого потенциала (у троих испытуемых показатели увеличились на 4 балла, у одного – на 7 баллов). Остальные испытуемые прибавили от 1-го до 4-х баллов. У четверых человек показатели не изменились. Расчет Т-критерия Вилкоксона показывает, что сдвиги в показателях творческого потенциала в группе исследуемых значимы (для выборки 22 человека Т Эмп. = 10 при Т Крит. = 55, для $p<0,01$ и Т Крит. 75 для $p<0,05$).

Таким образом, можно сказать, что написание эссе оказало влияние на развитие творческого потенциала, однако достоверно оценить величину и долговременность влияния нельзя. Возможно, значительную роль сыграло то психическое состояние, которое учащиеся переживали сразу после написания эссе.

Заключение и выводы

Таким образом, написание эссе может служить средством актуализации системы творческих стимулов, создавая ситуацию самостоятельного смыслового анализа. Человек здесь не только обращается к содержащемуся в личном опыте арсеналу переживаний, соотнося их с музыкальным произведением, но и формирует способность выбора из арсенала имеющихся в опыте средств и образов, ищет вербальные конструкции, наиболее полно передающие содержание впечатлений, в определенном смысле формируя опыт творческих действий. Расширяется репертуар подбора средств «перевода» переживаний в текст, что и увеличивает общий творческий потенциал. Г. А. Орлов отмечал, что искусство выявляет скрытые уровни и планы внутренней жизни слушателя и тем самым «формирует его внутреннюю интеллектуальную, эмоциональную, чувственную и духовную среду» [14, с. 325].

Можно предположить, что именно организация диалога с собой, когда внимание сосредоточено на улавливании и оформлении собственных переживаний, когда конструируются образы, несущие личностный смысл, актуализируется воображение – основной механизм влияния музыки на расширение творческих возможностей человека. Обогащается опыт вглядывания в себя, обогащающий представления о собственных возможностях. Такой опыт не осознается, но составляет личностную сторону творческого потенциала, развивая творческую мотивацию, формируя чувственную основу самораскрытия и самореализации, увеличивая свободу в выборе и выполнении действий. Целенаправленное прослушивание музыки с последующим его описанием может само по себе стать достаточно значимым переживанием, развивая такие качества творческого потенциала, как целостность, реализация возможностей свободного ассоциирования.

В итоге со значительной вероятностью можно утверждать, что рефлексивные размышления о своих впечатлениях от прослушивания музыкального произведения – эффективный способ самопознания, расширяющий творческий потенциал человека. М. К. Мамардашвили отмечал: «Познать самого себя – это прежде всего познать те впечатления, которые говорят нам о чем-то скрытом в нас, из-за чего мы волнуемся, из-за чего переживаем что-то» [15, с. 216].

Литература

1. Дружинин, В. Н. Психология общих способностей / В. Н. Дружинин. – Санкт-Петербург : Питер, 1999. – 368 с. – Текст : непосредственный.

2. Zavoyskiy, S. Affect-incongruency in emotional responses to music / S. Zavoyskiy, C. L. Taylor, R. S. Friedman. – DOI: 10.1037/pmu0000156 // Psychomusicology: Music, Mind, and Brain. – 2016. – № 26 (3). – P. 247–256.

3. Renzulli, J. S. Developing Creativity Across All Areas of the Curriculum / J. S. Renzulli // Nurturing creativity in the classroom / eds. R. A. Begetto, J. C. Kaufman. – New York : Cambridge University Press, 2017. – P. 23–44.

4. Kemper, K. J. Music as Therapy / K. J. Kemper, S. C. Danhauer // Southern Medical Journal. – 2005 –№ 98 (3). – P. 282–288. – URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15813154/ (date of application: 20.01.2022).

5. Малинковская, А. В. Исполнительская интерпретация музыкального произведения как объект исследования: к вопросу о доказательности теоретического суждения / А. В. Малинковская. – Текст : непосредственный // Музыкальное искусство и образование. – 2020. – Т. 8, № 4. С. 9–28.

6. Рева, В. П. Практикоориентированные стратегии погружения учащихся в художественный мир музыкальных произведений / В. П. Рева. – Текст : непосредственный // Музыкальное искусство и образование. – 2019. – Т. 7, № 1. – С. 25–39.

7. Железовская, Г. И. Творческий потенциал и его измерение / Г. И. Железовская, Н. В. Абрамова, Е. Н. Гудкова. – Текст : непосредственный // Сборники конференций НИЦ СОЦИОСФЕРА. – 2014. – № 2. – С. 12–15.

8. Кузнецова, А. А. Творческий потенциал студента в аспекте образовательного процесса вуза / А. А. Кузнецова. – Текст : непосредственный // Региональный вестник. – 2020. – № 1 (40). – С. 90–92.

9. Виниченко, Т. Н. Творческий потенциал студентов: критерии оценки и уровни сформированности / Т. Н. Виниченко, М. А. Ковалева, Т. Н. Свиридова. – Текст : непосредственный // Экономические и гуманитарные исследования регионов. – 2021. – № 1. – С. 23–29.

10. Barbot, B. Creative potential in educational settings: its nature, measure, and nurture / B. Barbot, V. Besançon, T. Lubart. – DOI: 10.1080/03004279.2015.1020643 // Education. – 2015. – Vol. 43 (4), № 3–13. – P. 1–11.

11. Brito, S. V. Teaching and Detecting The Creative Potential – Experience and Perspectives / S. V Brito // Open access peer-reviewed chapter. – URL: https://www.intechopen.com/chapters/47595 (date of application: 20.01.2022).

12. Рогов, Е. И. Настольная книга практического психолога : учебное пособие : в 2 книгах. Книга 2: Работа психолога со взрослыми. Коррекционные приемы и упражнения / Е. И. Рарог. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Москва : ВЛАДОС-Пресс, 2008. – 476 с. – Текст : непосредственный.

13. Ражников, В. Г. Диалоги о музыкальной педагогике / В. Г. Ражников. – Москва : Музыка, 1989. – 141 с. – Текст : непосредственный.

14. Орлов, Г. А. Древо музыки / Г. А. Орлов. – Вашингтон : H.A. Frager & Co ; Санкт-Петербург : Советский композитор, 1992. – 408 с. – Текст : непосредственный.

15. Мамардашвили, М. К. Эстетика мышления / М. К. Мамардашвили. – Москва : Московская школа политических исследований, 2000. – 416 с. – Текст : непосредственный.

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 г. Выпуск 1 (64). С. 226–232

УДК 316.74:37
DOI: 10.18822/byusu202201226-232

РЕСУРСНЫЙ ПОДХОД К ПРОФЕССИОНАЛЬНОМУ БЛАГОПОЛУЧИЮ ПЕДАГОГОВ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Журавлева Юлия Александровна
кандидат психологических наук,
педагог-психолог МБОУ «Ямальская школа-интернат
имени Василия Давыдова»,
с. Яр-Сале, ЯНАО, Россия
E-mail: zhurava.psi@mail.ru

Целью представленного в статье исследования стал теоретический анализ научных работ, посвященных проблеме изучения неблагоприятных факторов профессиональной деятельности педагогов в условиях Крайнего Севера России. Показано, что совокупность неблагоприятных климатогеографических и социально-психологических факторов оказывает деструктивное влияние на благополучие педагогов и нередко переживается ими как критическая ситуация. Результаты теоретического и эмпирического исследования переживания педагогами трудных, критических ситуаций позволили определить индивидуальные психологические особенности, составляющие ресурс личности педагога. Представление о личностных ресурсах педагогов, включающих в себя выраженность свойств темперамента (активность, темп, эмоциональность, импульсивность – сдержанность, пластичность – ригидность), особенности доминирующего психического состояния и настроения с позиции их благоприятности или неблагоприятности, уровень психологической устойчивости личности составили основу авторской модели профилактики. Разработанная модель психолого-педагогической профилактики может использоваться психологами образования как теоретико-методологическая основа для разработки программ работы с педагогами в образовательных организациях Крайнего Севера России.

Ключевые слова: синдром полярного напряжения, профессиональное благополучие педагога, ресурсы личности, кризисный профиль личности педагога, психопрофилактика.

RESOURCE APPROACH TO THE PROFESSIONAL WELL-BEING OF TEACHERS IN THE CONDITIONS OF THE FAR NORTH

Yulia A. Zhuravleva
Candidate of Psychological Sciences,
Teacher-psychologist of the Yamal boarding school
named after Vasily Davydov,
Yar-Sale village, YANAO, Russia
E-mail: zhurava.psi@mail.ru

The purpose of the research presented in the article was the theoretical analysis of scientific papers devoted to the problem of studying the unfavorable factors of professional activity of teachers in the conditions of the Far North of Russia. It is shown that the combination of unfavorable climatic, geographical and socio-psychological factors have a destructive effect on the well-being of teachers and are often experienced by them as critical situations. The results of a theoretical and empirical study of teachers' experiences of difficult, critical situations allowed us to determine individual psychological characteristics that make up the teacher's personality resource. The idea of teachers' personal resources, including the severity of temperament properties (activity, pace, emotionality, impulsivity – restraint, plasticity – rigidity), the features of the dominant mental state and mood from the position of their favorability or unfavorability, the level of psychological stability of

the individual formed the basis of the author's model of prevention. The developed model of psychological and pedagogical prevention can be used by educational psychologists as a theoretical and methodological basis for the development of work programs with teachers in educational organizations of the Far North of Russia.

Keywords: polar stress syndrome, professional well-being of a teacher, personal resources, crisis profile of a teacher's personality, psychoprophylaxis.

Введение

Современная школа предъявляет повышенные требования к личностным и профессиональным качествам педагогов. Динамично изменяющиеся условия и требования к организации образовательного процесса, научно-технический прогресс, требующий постоянного саморазвития и самообразования специалистов, в совокупности с высокими психоэмоциональными нагрузками и трудозатратами неизбежно влекут за собой истощение личностных ресурсов учителей. Это приводит к переживанию неудовлетворенности своим трудом и нежеланию продолжать педагогическую деятельность, в крайних случаях – к психосоматическим заболеваниям [9]. Повышение уровня эмоционального напряжения, состояние психофизиологического истощения, как правило, свидетельствуют о развитии синдрома эмоционального выгорания. Повышают вероятность формирования данного синдрома особенности проживания и работы в условиях Крайнего Севера России.

Комплекс природно-климатических факторов Крайнего Севера, в частности его восточной части, оказывает выраженное негативное влияние на физическое и психическое состояние человека, получившее название «синдрома полярного напряжения». Данный синдром был описан еще в 1971 году В. П. Казначеевым, результаты исследований которого доказали негативное действие совокупности неблагоприятных климатогеографических факторов среды на соматическое и психологическое здоровье человека. К факторам, оказывающим неблагоприятное влияние на человека, ученые относят продолжительный холодный период, когда низкая температура воздуха сочетается с сильными ветрами, короткое лето, высокую влажность (Н. А. Агаджанян, Л. В. Саламатина, Е. Н. Леханова, П. Г. Петрова); крайнюю неравномерность солнечной инсоляции, сопровождающую такие явления, как полярная ночь и полярный день (Б. В. Койранский, М. В. Дмитриев, В. В. Орехов, В. П. Казначеев, Н. Р. Деряпа, А. В. Трофимов); геомагнитную активность и резкие перепады атмосферного давления (Б. В. Рихтер, Н. И. Бобров, О. П. Ломов, В. П. Тихомиров). По нашему мнению, негативное влияние имеет значительная отдаленность некоторых населенных пунктов от районных центров или материка, плохое транспортное сообщение, вызывающие в свою очередь субъективное переживание «изолированности от мира». Сочетание неблагоприятных природно-климатических и социально-психологических факторов в условиях Заполярья существенно повышает нагрузку на психоэмоциональную сферу личности учителей и может стать причиной возникновения профессиональных деструкций, формирования неблагоприятных функциональных состояний.

Особое значение в данном случае приобретает изучение индивидуальных психологических особенностей педагога, составляющих ресурсы его личности, позволяющих воспринимать возникающие трудные профессиональные или жизненные ситуации не как трагическое событие, а как возможность по-новому посмотреть на обстоятельства, изменить свое отношение к ним, к самому себе. На наш взгляд, актуализация внутренних ресурсов позволит педагогам адаптироваться к неблагоприятным условиям жизнедеятельности, самостоятельно находить решения социально и профессионально значимых проблем, кризисов, возникающих в том числе и в профессиональной деятельности. При таких условиях мы можем говорить о психологическом, социальном и профессиональном благополучии педагога.

Таким образом, целью данной работы является разработка модели психолого-педагогической профилактики профессионального неблагополучия педагогов в условиях Крайнего Севера. Для достижения поставленной цели были определены задачи: выявить неблагоприятные факторы профессиональной деятельности педагогов в условиях Крайнего Севера; определить индивидуальные психологические особенности, составляющие личностные ресурсы педагогов.

Для решения поставленных задач использовались теоретические (анализ научных источников, обобщение, аналогия, индукция и дедукция) и эмпирические (измерение, описание, анкетирование) методы исследования. При конструировании модели психологической профилактики применялся метод теоретического моделирования.

Результаты и обсуждение

Характер и глубина переживания любых жизненных или профессиональных трудностей, кризисов, эффективность их преодоления определяются индивидуальными психологическими особенностями, составляющими ресурс личности педагога. Анализ различных подходов к пониманию потенциального в личности, а также результаты проведенных эмпирических исследований позволили нам выявить ресурсы педагога, определяющие конструктивное-деструктивное переживание трудных, критических ситуаций [5].

Следует отметить, что, говоря о кризисах, мы подразумеваем «личностно-ситуативное явление в жизни человека, которое приобретает «кризисную нагрузку» только благодаря переживанию и, что самое важное, только в переживании» [4, с. 5]. Понятие кризиса в данном случае включает достаточно широкий диапазон явлений, описываемых учеными как жизненные трудности, критические ситуации, негативные жизненные события, стрессовые жизненные события, травматические события, нежелательные события, жизненные кризисы, бедствия, катастрофы, которые предъявляют к людям повышенные требования и превышают их обычный адаптивный потенциал (А. Г. Амбрумова, В. А. Ананьев, И. А. Баева, Л. С. Выготский, С. В. Духновский, Л. В. Куликов, В. В. Лукин-Григорьев, В. С. Мерлин, К. Муздыбаев, Е. Л. Солдатова, Э. Э. Сыманюк и др.).

Результаты проведенных ранее исследований доказали, что наличие или отсутствие ресурсов личности определяется выраженностью таких свойств темперамента, как активность, темп, эмоциональность, импульсивность – сдержанность, пластичность – ригидность; параметрами доминирующего психического состояния и настроения с позиции их благоприятности – неблагоприятности для педагога, а также психологической устойчивостью личности, составляющими которой являются стойкость, уравновешенность и сопротивляемость [8]. Сочетание индивидуальных психологических особенностей, определяющих ситуационное реагирование личности на кризис и наличие или отсутствие ресурсов для его преодоления, составляет «кризисный профиль» личности педагога (С. В. Духновский, Ю. А. Журавлева). В зависимости от «кризисного профиля» педагога строится прогноз дальнейшего развития его личности – благоприятный, неблагоприятный или неопределенный (В. А. Ананьев, С. В. Духновский). Благоприятность в данном случае рассматривается с точки зрения влияния ситуации и ее восприятия на будущее педагога, его психологическое, социальное и профессиональное благополучие. Наличие неблагоприятного прогноза развития личности, проявляющееся в понижении психологической устойчивости личности и повышении уровня ситуационного реагирования, будет способствовать развитию синдрома «эмоционального выгорания» педагогов [7].

Отметим, что профессиональное благополучие является многомерным понятием, отражающим компетентность и самостоятельность педагога как профессионала, позитивное отношение к коллегам, стремление к достижению профессиональных целей и к саморазвитию.

Для изучения факторов профессиональной деятельности, переживаемых педагогами как критические и оказывающих деструктивное влияние на их личность, был проведен анализ теоретических научных работ, посвященных данной проблематике, а также результатов собственных эмпирических исследований. Проведенные автором исследования, включившие в

выборку 613 педагогов образовательных организаций г. Кургана и Курганской области различного типа, доказали, что конструктивный – деструктивный характер переживания педагогами трудных, кризисных ситуаций зависит от индивидуальных психологических особенностей, составляющих личностный ресурс педагогов, необходимый для его преодоления [5].

Для решения задачи по изучению восприятия педагогами неблагоприятных факторов профессиональной деятельности в условиях Крайнего Севера реализовано психолого-педагогическое исследование. В исследовании приняли участие 97 учителей Ямальской школы-интерната имени Василия Давыдова (Ямало-Ненецкий автономный округ). Анализ характера трудностей, с которыми сталкиваются педагоги школы-интерната, позволил нам сделать следующие выводы. Факторами стресса общего характера являются специфика профессиональной деятельности педагогов (высокие психоэмоциональные нагрузки, постоянная вовлеченность в образовательный процесс, непрерывная коммуникация и др.). В качестве трудностей частного характера респонденты отмечают особенности работы с учениками, являющимися представителями коренных малочисленных народов Севера (далее по тексту КМНС). В частности, особенности уклада жизни, организации быта и культурных традиций кочевых народов Севера, продолжительный период адаптации детей – представителей КМНС к условиям обучения и проживания в интернате.

О сильной стрессовой нагрузке, которую несет в себе трудовой фактор профессиональной деятельности педагогов, свидетельствуют результаты исследований, проводимые на базе Ямальской школы-интерната Научным центром изучения Арктики (г. Надым). Полученные учеными данные говорят о том, что профессиональная деятельность вызывает постоянное беспокойство у педагогов, способствует развитию состояния психического и физического истощения. Данные состояния сопровождаются снижением уровня нервно-психологической устойчивости личности у педагогического состава школы.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что совокупность отмеченных выше факторов способствует повышению психоэмоциональной нагрузки, оказывает деструктивное влияние на личность педагога, его отношение к профессиональной деятельности и качество ее выполнения.

Полагаем, что основу профессионального благополучия педагогов, в том числе в условиях Крайнего Севера, могут составить психопрофилактические мероприятия, направленные на актуализацию личностных ресурсов педагогических работников. В рамках психолого-педагогического сопровождения профессиональной деятельности педагогов реализуется комплекс мероприятий по психологическому изучению индивидуальных особенностей педагогов, оказанию им психологической помощи в развитии личностных качеств, получении знаний, формировании умений и навыков, необходимых для успешной профессиональной самореализации.

На наш взгляд, психолого-педагогическое сопровождение педагогической деятельности может быть реализовано в двух направлениях – *предупреждение (психопрофилактика) и преодоление (психологическое консультирование и психокоррекция)* трудностей, возникающих в процессе профессиональной деятельности учителей.

Предупреждение или психопрофилактика предполагает заботу о психологическом здоровье, поддержание личностных ресурсов педагогов на должном уровне, оказание методической помощи в профессиональных вопросах. Данный вид психологической помощи целесообразно применять при выявлении у педагога достаточного уровня ресурсов личности для конструктивного преодоления различного рода трудных жизненных и профессиональных ситуаций. В рамках данного направления психолого-педагогического сопровождения могут применяться такие формы работы, как:

1. Психологическое просвещение и обучение. Здесь мы опираемся на развитие «психологической культуры» и развитие у учителя навыков психогигиены, которые включают в себя заботу о психическом здоровье, умение преодолевать трудные жизненные и профессиональные ситуации, сохраняя при этом свою эффективность как личность и как профессионал. Основу психологической культуры составляют:

– самопознание и самооценка;
– стремление к познанию других людей;
– умение управлять своим поведением, эмоциями.

Специалистами-психологами могут проводиться практические занятия по следующим темам: «Саморегуляция эмоциональных состояний», «Заповеди психического здоровья», «Мой внутренний мир» и др. Формой организации занятий может быть как индивидуальная, так и групповая. Одним из вариантов реализации психологического просвещения и обучения для новых сотрудников являются занятия, проводимые в рамках «Школы молодого педагога».

По запросу педагогов возможно проведение индивидуальных консультаций, например, по вопросам организации служебного времени («Основы тайм-менеджмента»), корректировке режима работы и отдыха, выбору оптимального стиля педагогического взаимодействия, способа поведения в конфликтных ситуациях и др.

2. Проведение психологической диагностики с целью мониторинга психоэмоционального состояния педагогов; оценки их личностных ресурсов, необходимых для успешной реализации в своей профессиональной деятельности. Для решения поставленных задач положительно зарекомендовал себя комплекс следующих психодиагностических методик: «Переживание психологического кризиса личностью» С. В. Духновского; «Опросник свойств темперамента» и «Доминирующее состояние» Л. В. Куликова; «Шкала субъективного благополучия» Г. Перуэ-Баду в адаптации М. В. Соколовой; модифицированный Л. Н. Собчик вариант интерперсональной диагностики Т. Лири «Диагностика межличностных отношений». Полученные с использованием данных методик результаты позволяют выявить степень переживания педагогом кризисной ситуации, его «кризисный профиль», свидетельствующий о наличии или отсутствии личностных ресурсов, следовательно, позволяющий построить прогноз дальнейшего развития личности (благоприятный, неблагоприятный, неопределенный).

Немаловажное значение имеет оценка удовлетворенности существующей системой взаимоотношений педагога в коллективе, своевременная их корректировка. Для этого специалистом-психологом может проводиться диагностика удовлетворенности морально-психологическим климатом в коллективе, степени сплоченности коллектива с использованием методов тестирования, анкетирования и социометрического опроса. Напомним, что наличие благоприятных межличностных отношений в коллективе является ресурсом для специалиста, дающим ему помощь и поддержку со стороны коллег.

Преодоление трудностей, возникающих в процессе профессиональной деятельности учителей, реализуется в двух формах – *психологическое консультирование и психокоррекция*.

Психологическое консультирование направлено на раннее выявление трудностей и проблем у педагога, возникающих в процессе его профессиональной деятельности. В данном случае учитель самостоятельно обращается за психологической консультационной помощью либо может быть направлен руководством образовательной организации.

Консультационная помощь проводится в индивидуальной форме. Разрабатываются рекомендации по снижению психоэмоционального напряжения, развитию навыков саморегуляции эмоциональных состояний; при необходимости – коррекции режима работы и отдыха, способствующие повышению психологической устойчивости личности; по гармонизации межличностных отношений с участниками педагогического процесса, в частности, по использованию в процессе взаимодействия навыков снижения эмоционального напряжения у себя и партнера, использованию техник активного слушания, подачи обратной связи, способности принимать партнера таким, какой он есть, навыков разрешения конфликтных ситуаций и др.

При выявлении деструктивных переживаний, сочетающихся с отсутствием потенциала личности для самостоятельного выхода из сложившейся ситуации, требуется более «глубокий» вид психологической помощи – *психокоррекция*.

Психокоррекция может проводиться как в индивидуальной, так и в групповой форме. Выбор формы работы определяется пожеланием самого педагога и его текущим психоэмоциональным состоянием.

Оптимальной, на наш взгляд, формой организации коррекционной работы является групповой психологический тренинг. Основу программы могут составлять социально-психологический тренинг с включением отдельных элементов программ тренингов по управлению стрессами, саморегуляции эмоциональных состояний, делового общения, урегулирования конфликтов, личностного роста, повышения самооценки, развития креативности, а также авторские разработки и модификации.

Учитывая тот факт, что мы работаем со взрослой категорией участников группы, целесообразнее выбирать такие формы обучения, как мини-лекция, семинар, демонстрация, разбор конкретных ситуаций, деловые и ролевые игры, психогимнастика, дискуссия (в малой и большой группе). Для самостоятельной проработки существующих трудностей, анализа работы в группе, развития рефлексии возможно использование домашних заданий, ведения записей в рабочей тетради.

Анализируя текущее психоэмоциональное состояние педагога, характер трудностей, с которыми он сталкивается в процессе профессиональной деятельности, специалистом-психологом выбираются соответствующие формы и методы работы, грамотное сочетание и использование которых позволяет поддерживать психологическое, социальное и профессиональное благополучие педагогов, в том числе в условиях работы на Крайнем Севере.

Заключение и выводы

Психолого-педагогическая модель профилактики, построенная на психодиагностической основе с учетом личностных ресурсов педагога, определяет содержание, формы и методы психопрофилактической работы, направленной на предупреждение (психопрофилактика) и преодоление (психологическое консультирование и психокоррекция) профессионального неблагополучия педагогов в условиях Крайнего Севера. Эффективность психопрофилактической работы достигается благодаря комплексному сочетанию психологического просвещения, обучения, консультирования и коррекции, направленных на актуализацию личностных ресурсов педагогов.

Список литературы

1. Ананьев, В. А. Основы психологии здоровья. Книга 1. Концептуальные основы психологии здоровья / В. А. Ананьев. – Санкт-Петербург : Речь, 2006. – 384 с. – Текст : непосредственный.

2. Баева, И. А. Психологическая безопасность образовательной среды: учебное пособие / И. А. Баева, Е. Н. Волкова, Е. Б. Лактионова ; под редакцией И. А. Баевой. – Москва : Экон-Информ, 2009. – 247 с. – Текст : непосредственный.

3. Березовская, Р. А. Профессиональное благополучие: проблемы и перспективы психологических исследований / Р. А. Березовская. – Текст : непосредственный // Психологические исследования. – 2016. – Т. 9, № 45. – С. 2.

4. Духновский, С. В. Психодиагностическая методика «Переживание кризиса личностью» : руководство по применению / С. В. Духновский. – Курган : Издательство Курганского государственного университета, 2016. – 51 с. – Текст : непосредственный.

5. Журавлева, Ю. А. Переживание педагогами кризиса в межличностных отношениях с субъектами педагогического процесса : диссертация на соискание ученой степени кандидата психологических наук : 19.00.07 / Ю. А. Журавлева. – Саратов, 2020. – 205 с. – Текст : непосредственный.

6. Журавлева, Ю. А. Особенности дистанции в межличностных отношениях воспитателей дошкольных образовательных учреждений переживающих и не переживающих кри-

зис / Ю. А. Журавлева, С. В. Духновский. – Текст : непосредственный // Успехи современной науки и образования. – 2017. – Т. 6, № 2. – С. 51–57.

7. Журавлева, Ю. А. «Кризисные профили» личности субъектов педагогического процесса / Ю. А. Журавлева. – Текст : непосредственный // Личность в норме и патологии : материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Челябинск : Печатный двор, 2017. – С. 278–281.

8. Куликов, Л. В. Психогигиена личности. Вопросы психологической устойчивости и психопрофилактики / Л. В. Куликов. – Санкт-Петербург : Питер, 2004. – 464 с. – Текст : непосредственный.

9. Маклаков, А. Г. Человек в экстремальных условиях и личностный адаптационный потенциал / А. Г. Маклаков. – Текст : непосредственный // Психологический журнал. – 2001. – Т. 22, № 1. – С. 16–24.

10. Муздыбаев, К. Стратегия совладания с жизненными трудностями / К. Муздыбаев. – Текст : электронный // Журнал социологии и социальной антропологии. – 1998. – Т. 1, Вып. 2. – URL: http://www.soc.pu.ru/publ (дата обращения: 15.01.2022).

11. Тарабрин, А. П. Особенности профессиональной адаптации учителя к педагогической работе в условиях Крайнего Севера : диссертация на соискание ученой степени кандидата педагогических наук : 13.00.01 / А. П. Тарабрин. – Москва, 2000. – 268 с. – Текст : непосредственный.

Научное издание

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 1 (64)/2022

Цена свободная

16+

Учредитель и издатель: ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-73606 от 31 августа 2018 г.

Дата выхода в свет 31.03.2022

Формат 60x84 1/8. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 27,1. Тираж 1000 экз. Заказ № 267.

Адрес учредителя, издателя и редакции:
628012, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра,
г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16

Отпечатано в секторе редакционно-издательской работы
Научной библиотеки ФГБОУ ВО ЮГУ:
628012, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра,
г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16

Главный редактор – Лапшин Валерий Федорович,
тел. +7 (3467) 377-000 (доб. 559)