

**АКАДЕМИЯ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ
«ACADEMY OF NATURAL HISTORY»**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ
И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

**INTERNATIONAL
JOURNAL OF APPLIED
AND FUNDAMENTAL
RESEARCH**

Журнал основан в 2007 году
The journal is based in 2007
ISSN 1996-3955

Двухлетний импакт-фактор
РИНЦ = 0,593

Пятилетний импакт-фактор
РИНЦ = 0,299

№ 11 2024

Научный журнал
Scientific journal

Журнал International Journal of Applied and Fundamental Research (Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований) зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС 77-60735.

Электронная версия размещается на сайте www.rae.ru

The electronic version takes places on a site www.rae.ru

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

к.м.н. Н.Ю. Стукова

Ответственный секретарь

к.м.н. М.Н. Бизенкова

EDITOR

Natalia Stukova

Senior Director and Publisher

Maria Bizenkova

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.б.н., проф. Абдуллаев А. (Душанбе); к.б.н. Алиева К.Г. (Махачкала); д.х.н., к.ф.-м.н., проф. Алоев В.З. (Чегем-2); д.б.н., проф. Андреева А.В. (Уфа); к.географ.н., доцент Аничкина Н.В. (Липецк); к.ф.-м.н. Барановский Н.В. (Томск); д.б.н., доцент Белых О.А. (Иркутск); д.т.н., проф. Бурмистрова О.Н. (Ухта); д.т.н., доцент Быстров В.А. (Новокузнецк); д.м.н., проф. Гарбуз И.Ф. (Тирасполь); д.ф.-м.н., проф. Геворкян Э.А. (Москва); д.х.н., проф. Гурбанов Г.Р. (Баку); д.ветеринар.н., доцент Ермолина С.А. (Киров); к.т.н. Есенаманова М.С. (Атырау); к.ф.-м.н., д.п.н., проф. Ефремова Н.Ф. (Ростов-на-Дону); д.м.н. Жураковский И.П. (Новосибирск); д.т.н., доцент Ибраев И.К. (Темиртау); к.т.н., доцент Исмаилов З.И. (Баку); д.б.н., с.н.с. Кавцевич Н.Н. (Североморск); д.т.н., проф. Калмыков И.А. (Ставрополь); д.б.н. Кокорева И.И. (Алматы); д.г.-м.н., доцент Копылов И.С. (Пермь); к.б.н., доцент Коротченко И.С. (Красноярск); к.с.-х.н., доцент Кряжева В.Л. (Нижний Новгород); д.ф.-м.н., доцент Кульков В.Г. (Волжский); д.б.н. Ларионов М.В. (Балашов); д.б.н., к.с.-х.н., доцент Леонтьев Д.Ф. (Иркутск); д.географ.н., к.б.н., проф. Луговской А.М. (Москва); д.г.-м.н., с.н.с. Мельников А.И. (Иркутск); д.т.н., проф. Несветаев Г.В. (Ростов-на-Дону); д.с.-х.н. Никитин С.Н. (п. Тимирязевский); д.фарм.н., доцент Олешко О.А. (Пермь); д.с.-х.н., с.н.с., проф. Партоев К. (Душанбе); к.п.н., доцент Попова И.Н. (Москва); д.т.н., проф. Рогачев А.Ф. (Волгоград); д.м.н., с.н.с., доцент Розыходжаева Г.А. (Ташкент); д.г.-м.н. Сакиев К.С. (Бишкек); д.т.н., проф. Сугак Е.В. (Красноярск); д.ветеринар.н., проф. Трефилов Б.Б. (Санкт-Петербург); к.т.н., доцент Хайдаров А.Г. (Санкт-Петербург); д.м.н., проф. Чарышкин А.Л. (Ульяновск); д.географ.н., проф. Чодураев Т.М. (Бишкек); д.б.н., проф. Шалпыков К.Т. (Бишкек); к.х.н. Шарифуллина Л.Р. (Москва); д.п.н., проф. Щирин Д.В. (Санкт-Петербург)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ
И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED
AND FUNDAMENTAL RESEARCH

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ.

Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals directory» в целях информирования мировой научной общественности.

Журнал представлен в ведущих библиотеках страны и является рецензируемым.

Журнал представлен в НАУЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ БИБЛИОТЕКЕ (НЭБ) –
головном исполнителе проекта по созданию Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) и имеет импакт-фактор Российского индекса научного цитирования (ИФ РИНЦ).

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,593.

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,299.

Учредитель, издатель и редакция:
ООО НИЦ «Академия Естествознания»

Почтовый адрес: 105037, г. Москва, а/я 47
Адрес редакции и издателя: 410056, г. Саратов, ул. им. Чапаева В.И., д. 56

ISSN 1996-3955

Тел. редакции – 8-(499)-705-72-30

E-mail: edition@rae.ru

Зав. редакцией Т.В. Шнуровозова
Техническое редактирование и верстка Е.Н. Доронкина
Корректор Е.С. Галенкина, Н.А. Дудкина

Подписано в печать – 29.11.2024
Дата выхода номера – 28.12.2024

Формат 60x90 1/8
Типография
ООО НИЦ «Академия Естествознания»
410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5

Распространяется по свободной цене

Усл. печ. л. 7,4
Тираж 500 экз.
Заказ МЖПиФИ 2024/11

© ООО НИЦ «Академия Естествознания»

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬИ

- УСЛОВИЯ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ ШТАММОВ БАЗИДИАЛЬНЫХ
ГРИБОВ РОДА LENTINUS, ХАРАКТЕРИСТИКА СОСТАВА
И БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ
Ананьева Е.П., Гурина С.В., Псурцева Н.В. 7
- ВЛИЯНИЕ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ЦИТРАТОМ
НАНОРАЗМЕРНОГО ДИОКСИДА ЦЕРИЯ
НА ЭКСПРЕССИЮ ГЕНОВ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО МЕТАБОЛИЗМА
В ЭМБРИОНАЛЬНЫХ ФИБРОБЛАСТАХ ЛЕГКИХ ЧЕЛОВЕКА
*Проскурнина Е.В., Созарукова М.М., Ершова Е.С., Савинова Е.А.,
Каменева Л.В., Вейко Н.Н., Костюк С.В.* 12

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

- ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТРОЙ ТОКСИЧНОСТИ НОВОГО
ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ЭКСТРАКТА БИОЛОГИЧЕСКИ
АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ
*Жукова О.Б., Зайцев К.В., Гостюхина А.А., Дорошенко О.С.,
Кожмякина А.Д., Степанова А.М., Гамеева Е.В.* 18

КЛИНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ

- КОМПЬЮТЕРНО-ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ
КАРЦИНОИДА АППЕНДИКСА
Азнауров В.Г., Азнаурова Н.К., Кондратьев Е.В. 23

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

- ОСОБЕННОСТИ ДЕЙСТВИЯ И ПОСЛЕДСТВИЯ ВЛИЯНИЯ
ГИПОТЕРМИИ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА. ПЕРСПЕКТИВЫ
ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ ГИПОТЕРМИИ
В МЕДИЦИНЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЙ
*Корсиков Н.А., Калинин Д.А., Перепелица И.Н., Долгатов А.Ю.,
Лепилов А.В., Бобров И.П., Долгатова Е.С., Бабкина А.В.* 28

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬИ

- ВЛИЯНИЕ ДОННОГО МИКРОРЕЛЬЕФА НА ПОГРЕШНОСТЬ
ИЗМЕРЕНИЙ ПО ДАННЫМ ПОДВОДНЫХ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЙ
Анисимов И.М. 34

АСПЕКТЫ ГОРЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА
ИЗ УГОЛЬНОГО ШЛАМА

Вилисов Н.Д., Фадеев П.И., Ушаков К.Ю., Богомолов А.Р. 40

ОБЗОРНАЯ ТЕЛЕВИЗИОННАЯ КАМЕРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЗООПЛАНКТОНА В ВОДОЕМАХ

Оленин А.Л. 45

МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ
GNU OCTAVE И RUTHON

Тырышкин С.Ю. 50

РАЗРАБОТКА НОВОЙ МОДЕЛИ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО НЕОБИТАЕМОГО
ПОДВОДНОГО АППАРАТА ГНОМ С МОДУЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ

Шерстов Е.А., Розман Б.Я., Елкин А.В. 55

CONTENTS

BIOLOGICAL SCIENCES

ARTICLES

CONDITIONS FOR CULTIVATION OF STRAINS OF BASIDIAL FUNGI
OF THE GENUS LENTINUS, CHARACTERISTICS OF COMPOSITION
AND BIOLOGICAL ACTIVITY

Ananieva E.P., Gurina S.V., Psurtseva N.V. 7

EFFECT OF CITRATE-COATED NANOCERIA ON THE EXPRESSION
OF OXIDATIVE METABOLISM GENES IN HUMAN EMBRYONIC
LUNG FIBROBLASTS

*Proskurnina E.V., Sozarukova M.M., Ershova E.S.,
Savinova E.A., Kameneva L.V., Veiko N.N., Kostyuk S.V.* 12

MEDICAL SCIENCES

ARTICLE

STUDY OF ACUTE TOXICITY OF A NEW ELECTROPULSE EXTRACT
OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES OF PLANT ORIGIN

*Zhukova O.B., Zaitsev C.V., Gostyuhina A.A., Doroshenko O.S.,
Kozhemyakina A.D., Stepanova A.M., Gameeva E.V.* 18

CLINICAL CASE

COMPUTED TOMOGRAPHY IMAGING OF APPENDICEAL CARCINOID

Aznaurov V.G., Aznaurova N.K., Kondratiev E.V. 23

REVIEW

FEATURES OF ACTION AND CONSEQUENCES OF HYPOTHERMIA
ON THE HUMAN BODY. PROSPECTS FOR THE APPLICATION
OF ARTIFICIAL HYPOTHERMIA IN MEDICINE OF EXTREME SITUATIONS

*Korsikov N.A., Kalin D.A., Perepelitsa I.N., Dolgatov A.Yu.,
Lepilov A.V., Bobrov I.P., Dolgatova E.S., Babkina A.V.* 28

TECHNICAL SCIENCES

ARTICLES

INFLUENCE OF SEAFLOOR MICRORELIEF ON MEASUREMENT
ERROR FROM UNDERWATER VIDEO DATA

Anisimov I.M. 34

ASPECTS OF COAL-WATER FUEL COMBUSTION FROM COAL SLUDGE

Vilisov N.D., Fadeev P.I., Ushakov K.Y., Bogomolov A.R. 40

SURVEY TELEVISION CAMERA FOR RESEARCH OF ZOOPLANKTON IN RESERVOIRS	
<i>Olenin A.L.</i>	45
MODELING QUANTUM SYSTEMS USING GNU OCTAVE AND PYTHON	
<i>Tyryshkin S.Yu.</i>	50
MODEL OF A REMOTE-CONTROLLED UNINHABITED UNDERWATER VEHICLE GNOM WITH A MODULAR STRUCTURE	
<i>Sherstov E.A., Rozman B.Ya., Elkin A.V.</i>	55

СТАТЬИ

УДК 582.284:57.083.13:678.048

**УСЛОВИЯ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ ШТАММОВ
БАЗИДИАЛЬНЫХ ГРИБОВ РОДА LENTINUS,
ХАРАКТЕРИСТИКА СОСТАВА И БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ**

¹Ананьева Е.П., ¹Гурина С.В., ²Псурцева Н.В.

¹Санкт-Петербургский химико-фармацевтический университет, Санкт-Петербург,
e-mail: svetlana.gurina@pharminnotech.com, elena.ananieva@pharminnotech.com;

²Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург, e-mail: nadyapsu@mail.ru

Исследование посвящено изучению особенностей культивирования грибов базидиомицетов и определению биологической активности их метаболитов. В результате скрининговых экспериментов по культивированию из шести штаммов исследуемых базидиомицетов были отобраны два штамма *Lentinus substrictus* (синоним *Polyporus ciliatus*). Они превосходили остальные культуры по скорости роста, ферментативной активности и уровню накопления биомассы мицелия и показателям, характерным для многих видов базидиальных грибов лакказной и протеолитической активности. Биомассу мицелия получали методом глубинного культивирования в жидкой глюкозо-пептонной среде. Были подобраны условия культивирования. Для повышенного накопления биомассы применяли дробное добавление глюкозы в процессе ферментации. Из мицелия базидиомицетов были выделены растворимые и нерастворимые углеводные фракции, состоящие преимущественно из полисахаридов с незначительным количеством белка. Основным углеводным компонентом полисахаридных фракций являлась глюкоза с существенным содержанием маннозы и галактозы и следовыми количествами фукозы и ксилозы. Выделенные фракции *L. substrictus* оказывали иммуностимулирующее действие, повышая микробоцидный эффект мононуклеарных фагоцитов в отношении золотистого стафилококка. При этом иммуностимулирующий эффект растворимой фракции был выше аналогичного эффекта нерастворимой фракции. Показано, что водные извлечения мицелия обладали антиоксидантной активностью.

Ключевые слова: базидиомицеты, биомасса мицелия, культивирование, полисахариды, иммуностимулирующее, антиоксидантное действие

**CONDITIONS FOR CULTIVATION OF STRAINS
OF BASIDIAL FUNGI OF THE GENUS LENTINUS,
CHARACTERISTICS OF COMPOSITION AND BIOLOGICAL ACTIVITY**

¹Ananieva E.P., ¹Gurina S.V., ²Psurtseva N.V.

¹St. Petersburg Chemical and Pharmaceutical University, St. Petersburg,

e-mail: svetlana.gurina@pharminnotech.com, elena.ananieva@pharminnotech.com;

²Botanical Institute named after V.L. Komarov RAS, St. Petersburg, e-mail: nadyapsu@mail.ru

The study is devoted to the peculiarities of basidiomycete fungi cultivation and determination of biological activity of their metabolites. Two strains of *Lentinus substrictus* were selected from six strains of basidiomycete as a result of screening experiments. Selected strains were superior to the other cultures in terms of growth rate, mycelial biomass accumulation, and laccase and proteolytic activities characteristic of many species of basidial fungi. Mycelial biomass was obtained by submerged cultivation in liquid glucose-peptone medium. Cultivation conditions were selected. Fractional addition of glucose during fermentation was used for increased accumulation of mycelial biomass. Soluble and insoluble carbohydrate fractions consisting mainly of polysaccharides with a small amount of protein were isolated from the basidiomycete mycelium. The main carbohydrate component of the polysaccharide fractions was glucose with a significant content of mannose and galactose and trace amounts of fucose and xylose. The isolated fractions of *Lentinus substrictus* had an immunostimulating effect, increasing the microbicidal effect of mononuclear phagocytes against *Staphylococcus aureus*. The immunostimulating effect of the soluble fraction was higher than the similar effect of the insoluble fraction. It was shown that aqueous extracts of mycelium had antioxidant activity.

Keywords: basidiomycetes, mycelium biomass, cultivation, polysaccharides, immunostimulating, antioxidant effect

Введение

Мицелий базидиальных грибов и его метаболиты обладают широким спектром биологической активности, в частности противоопухолевой, антиоксидантной, антимикробной и противовирусной активностями [1-3]. Полисахаридные компоненты, выделенные из плодовых тел или мицелия базидиомицетов, являются перспективными иммуностимуляторами [4; 5]. Суще-

ственным преимуществом базидиальных полисахаридов является физиологичность их действия на организм и отсутствие токсичности. Грибы базидиомицеты выращивают в виде плодовых тел, а также получают вегетативный мицелий при глубинном культивировании. Глубинное культивирование позволяет осуществлять регулируемый синтез нужных метаболитов, сократить время процесса в 3–5 раз и получать стандарт-

ный продукт. Актуальность исследования заключается в поиске новых перспективных базидиомицетов с высокой продуктивностью биологически активных метаболитов.

Цель исследования – изучение процесса глубинного культивирования штаммов базидиомицетов для повышения выхода биомассы мицелия, изучение его компонентного состава и биологической активности.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования были штаммы базидиальных грибов, полученные из Коллекции культур базидиомицетов Ботанического института им. В.Л. Комарова, РАН: *Lentinus substrictus* (Bolton) Zmitr. & Kovalenko LE-BIN 0626; *L. substrictus* LE-BIN 1601; *Ganoderma valesiacum* Boud. LE-BIN 2256; *Grifola frondosa* (Dicks.) Gray LE-BIN 2639; *Ganoderma tsugae* Murrill LE-BIN 1158; *Flammulina velutipes* (Curtis) Singer LE-BIN 1483.

Ростовые параметры и морфологические признаки исследуемых базидиомицетов изучали при культивировании на плотных питательных средах, где базидиомицеты образовывали мицелиальные колонии, состоящие из скопления вегетативных гиф.

Для определения скорости роста грибов использовали среды: сусло-агар (4% сусло; 2% агар), мальтекс-агар (1,5% мальтекс; 2% агар) и глюкозо-пептонный агар (ГПА). Состав последней среды аналогичен составу жидкой питательной среды, которая в дальнейших экспериментах будет использована для глубинного культивирования грибов.

Ростовой коэффициент определяли на седьмые сутки культивирования штаммов. Он является комплексным показателем, который учитывает скорость роста в единицу времени и коэффициент плотности мицелия (Кр):

$$Kp = (D / \tau) \cdot H \cdot \Pi,$$

где D – диаметр колонии, мм; H – высота мицелия, мм; Π – коэффициент плотности мицелия (1 – слаборазвитый, 2 – плотный, опушённый, 3 – кожистый, плотный); τ – количество суток.

Ферментативные свойства исследуемых штаммов оценивали по активности некоторых ферментов: протеолитических, лигнинолитического комплекса (ферментов лакказ).

Проверку протеиназной активности проводили на плотных питательных средах с молоком и желатином. Использовали метод аппликации мицелиальных дисков на среды с казеином и желатином. Измеряли зоны гидролиза субстратов.

Наличие компонентов лигнинолитического комплекса (ферментов лакказ) прове-

ряли на среде с реагентом АБТС: основа – сусло-агар 4% с добавлением 0,28% АБТС – 2,2'-азино-бис(3-этилбензотиазолин-6-сульфокислоты). На плотные питательные среды помещали агаровые блоки с двухнедельной культурой. Учет результатов проводился через 24 часа [6].

Для получения биомассы мицелия проводили глубинное культивирование грибов в жидкой питательной среде. Культуру выращивали в колбах Эрленмейера вместимостью 750 мл (объем питательной среды 150 мл) на лабораторном шейкере ($n = 220$ об./мин.). Культивирование проводили 10 суток при температуре 23-24°C. В качестве базовой питательной среды использовали глюкозо-пептонную среду (ГПС) [7].

Растворимые (НФр) и нерастворимые (НФн) углеводные фракции экстрагировали из измельченного мицелия водой при 100°C в течение 4-5 часов. Моносахаридный состав мицелия и полученных из него фракций определяли после полного кислотного гидролиза. Количественный анализ моносахаридного состава проводили методом ГЖХ с последующим расчётом соотношения площадей полученных пиков [7]. Антиоксидантную активность определяли методом активированной хемолуминесценции [8].

Иммунобиологическое действие выделенных углеводных фракций определяли по изменению микробоцидности макрофагов белых мышей по отношению к клеткам *Staphylococcus aureus* через 24 часа после введения препарата в количестве 100 мг/кг веса животного. Сравнивали выживаемость клеток после 1 минуты контакта со стимулированными полисахаридами макрофагами и макрофагами контрольной группы. Определяли константу киллинга, которая характеризует количество клеток тест-микроорганизма, погибших в единицу времени (минуту) под действием микробоцидных факторов, нарушающих жизнедеятельность микроорганизма [7].

Статистическая обработка результатов осуществлялась с помощью программы MS Excel. Результаты обрабатывали методом вариационной статистики с вычислением среднего арифметического для каждой группы опытов и стандартного отклонения от среднего арифметического.

Результаты исследования и их обсуждение

Наиболее высокую скорость роста наблюдали у штаммов *Lentinus substrictus* и *Flammulina velutipes*. Максимальный ростовой коэффициент (34,3 мм/сут.) отмечали у штамма *L. substrictus* LE-BIN 1601 при его росте на среде сусло-агар.

Базидиомицеты являются источниками различных ферментов, имеющих практическую ценность [9]. Для оценки ферментативного потенциала исследуемых грибов определяли их лакказную и протеолитическую активности. За 100% принимали максимальное значение показателей у наиболее активного штамма. При сравнении показателей лакказной активности исследуемых штаммов установлено, что максимальная активность (100%) обнаружена у штамма *F. velutipes* LE-BIN 1483. Оба исследованных штамма *Lentinus* обладали достаточно высокой активностью (92%). У штамма *G. frondosa* LE-BIN 2639 лакказная активность не была обнаружена.

Была выявлена высокая протеолитическая активность исследуемых штаммов, которая составляла от 62,3% до 86,7% от наиболее активного штамма. Наиболее активными были штаммы *L. substrictus* LE-BIN 0626, *L. substrictus* LE-BIN 1601 и *F. velutipes* LE-BIN 1483.

На основе проведенных экспериментов, с учетом скорости роста и ферментативной активности грибов, для изучения процессов глубинного культивирования было выбрано 4 штамма: *L. substrictus* LE-BIN 0626 и LE-BIN 1601, *F. velutipes* LE-BIN 1483 и *G. valesiacum* LE-BIN 2256.

Основными преимуществами глубинного культивирования являются регулиру-

емый синтез нужных метаболитов, сокращение времени процесса в 3–5 раз и получение стандартного продукта. Наиболее продуктивными по выходу биомассы мицелия оказались базидиомицеты рода *Lentinus* – выход биомассы мицелия составил 7,0 и 4,8 г/л.

Уже с первых суток культивирования отобранные штаммы начинали активно потреблять источники углерода и азота, при этом наблюдали значительный прирост биомассы мицелия. Наиболее продуктивным являлся штамм *L. substrictus* LE-BIN 0626, в то время как утилизация глюкозы проходила интенсивнее штаммом *L. substrictus* LE-BIN 1601. У обоих штаммов к седьмым суткам в питательной среде глюкозы почти не оставалось (0,09 мг/мл). Базидиомицеты показали высокую скорость накопления биомассы, и к седьмым суткам культивирования наблюдали переход в стационарную фазу роста. Таким образом, в данных условиях возможно сокращение времени культивирования с 10 до 7 суток для этих штаммов грибов, что представлено на рис. 1.

Характер потребления азота существенно не отличался у разных штаммов и имел сходные закономерности. Аминный азот к десятым суткам роста утилизировался на 90% и 80% штаммами *L. substrictus* LE-BIN 0626 и LE-BIN 1601 соответственно.

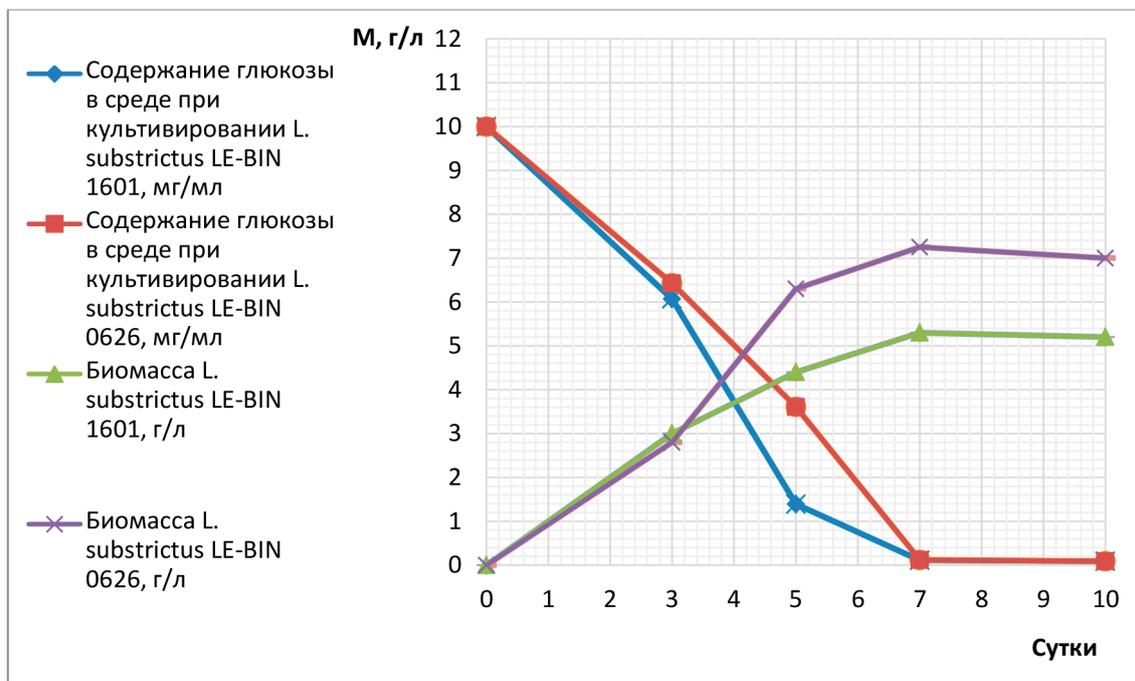


Рис. 1. Динамика утилизации источников углерода и накопление биомассы в процессе культивирования *L. substrictus* LE-BIN 0626 и *L. substrictus* LE-BIN 1601

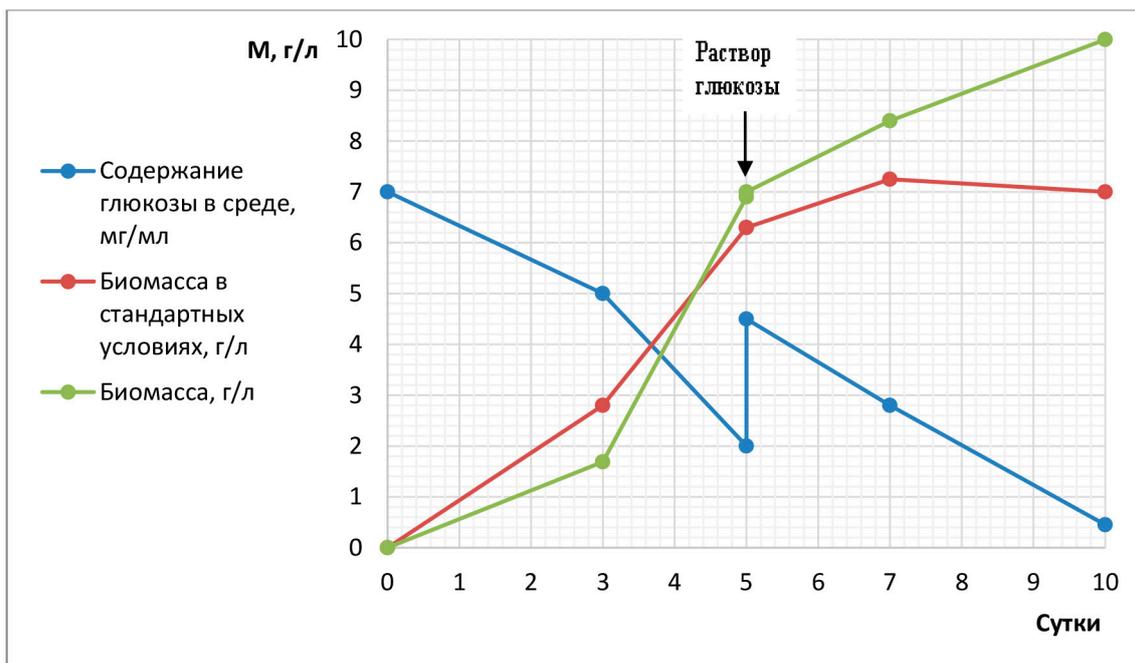


Рис. 2. Динамика утилизации источника углерода и накопления биомассы при культивировании *L. substrictus* LE-BIN 0626 с дробным добавлением глюкозы

Возможно, имеет место лимитирующее действие источника углерода на рост культуры вследствие того, что базидиомицет активно утилизировал глюкозу, и её концентрация уже к седьмым суткам снижалась практически до нуля.

С целью повышения выхода биомассы грибов провели эксперименты с дробной подачей раствора глюкозы. Для этого использовали ГПС, которая содержала 7 г/л глюкозы, и в процессе культивирования на пятые сутки проводили дробную подачу 10% раствора глюкозы таким образом, чтобы общее количество глюкозы в среде соответствовало количеству глюкозы в стандартной ГПС (10 г/л).

Дробное добавление глюкозы привело к значительному увеличению количества биомассы. Увеличение выхода мицелия составило 51% и 42% у штаммов LE-BIN 0626 и LE-BIN 1601 соответственно, и уже на седьмые сутки был отмечен прирост биомассы на 20% и 50% в сравнении с выходом биомассы в стандартных условиях (рис. 2).

Из полученной биомассы мицелия грибов методом водной экстракции мицелия были выделены нерастворимая (НФр) и растворимая фракции (РФр).

В выделенных фракциях определяли содержание полисахаридов (по количеству редуцирующих веществ в гидролизатах), белка, минеральных примесей. Также определяли количественно углеводный состав

полисахаридов – основного компонента фракций мицелия (таблица).

Показано, что мицелий и полученные из него фракции состояли преимущественно из полисахаридов. Содержание полисахаридов в мицелии составляло от 70% до 73%, белка до 17% и минеральных примесей – 6,4%. Фракции содержали от 61,5% до 85,4% полисахаридов, количество минеральных примесей было незначительным – менее 1%.

Был определен количественный моносахаридный состав выделенных фракций. Фракции, выделенные из мицелия исследованных грибов рода *Lentinus*, содержали глюкозу (60-81%), а также значительное количество маннозы (11,6% и 19% для штаммов LE-BIN 0626 и LE-BIN 1601 соответственно) и галактозы (5-10%), следовые количества ксилозы и фукозы (таблица).

Выделенные фракции мицелия использовали для определения их иммуностимулирующей активности в экспериментах *in vivo*.

Изучение иммунобиологической активности углеводных фракций показало, что константы киллинга после контакта с макрофагами, стимулированными НРф и РФр, составляли соответственно 6,0-6,2 и 6,7-6,9. Таким образом, полученные полисахаридные фракции достоверно увеличивали микробоцидный эффект макрофагов в среднем в 1,5 раза по сравнению с контролем.

Характеристики химического состава углеводных фракций мицелия
исследованных штаммов *Lentinus substrictus*

Образец	Компонентный состав мицелия, %			Углеводный состав полисахаридов, %				
	Полисахариды	Белок	Минеральные примеси	Глюкоза	Манноза	Галактоза	Ксилоза	Фукоза
РФр LE-BIN 0626	82,7±5,5	1,1±0,1	0,17±0,02	76,3	11,6	8,3	2,3	1,5
НФр LE-BIN 0626	61,5±3,1	4,2±0,8	1,0±0,1	81,4	11,5	5,6	1,1	0,4
РФр LE-BIN 1601	85,4±7,6	1,7±0,4	0,5±0,1	68,1	18,7	10,1	2,5	0,7
НФр LE-BIN 1601	67,6±4,5	8,8±1,2	0,4±0,1	70,7	17,7	8,4	2,3	0,84

Для определения антиоксидантных свойств были получены водные извлечения мицелия штаммов *L. substrictus*. Их добавляли к специальной аналитической системе АБАП/люминол и определяли активность антиоксиданта по интенсивности хемилюминесценции во времени [8]. Показано, что исследуемое водное извлечение мицелия обладало антиоксидантным действием со средним уровнем активности, сопоставимым с известным антиоксидантом – аскорбиновой кислотой.

Заключение

В результате экспериментов из шести культур базидиомицетов были отобраны два штамма из рода *Lentinus*, которые обладали наибольшей скоростью роста, накопления биомассы мицелия и ферментативной активностью. Данные штаммы в процессе глубинного культивирования активно накапливали биомассу с высоким выходом и полной утилизацией источника углерода (глюкозы). При этом время культивирования было сокращено с 10 до 7 суток. При дробном добавлении глюкозы на пятые сутки культивирования значительно повышался выход мицелия, от 42% до 51%. Из мицелия базидиомицетов были выделены фракции, состоящие преимущественно из полисахаридов (61-85%) с незначительным количеством белка (до 8,8%).

Показано, что полисахаридные фракции мицелия *L. substrictus* оказывали иммуностимулирующее действие, которое выражалось в усилении микрооцидного эффекта перитонеальных макрофагов мышей в эксперименте. Обнаружены антиоксидантные свойства водных извлечений мицелия *L. substrictus*.

Список литературы

1. Lowenthal R. The mycelium of the *Trametes versicolor* syn. *Coriolus versicolor* (Turkey tail mushroom) exhibit anti-melanoma activity in vitro // *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2023. Vol. 161. P. 114424.
2. Adongbede E.M. Antioxidant and antibacterial activity of *Trametes polyzona* (Pers.) Justo // *Food Science and Biotechnology*. 2020. Vol. 29. P. 27-33.
3. Mwangi R.W. The antioxidant potential of different edible and medicinal mushrooms // *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2022. Vol. 147. P. 112621.
4. Pandya U., Dhuldhaj U., Sahay N. Bioactive mushroom polysaccharides as antitumor: an overview // *Natural Product Research*. 2018. Vol. 33, № 3. P. 1-13.
5. Yang C.L.H., Chik S.C.C., Lau A.S.Y., Chan G.C.F. *Coriolus versicolor* and its bioactive molecule are potential immunomodulators against cancer cell metastasis via inactivation of MAPK pathway // *Journal of Ethnopharmacology*. 2023. Vol. 301. P. 115790.
6. Федорова Т.В., Шахова Н.В., Кляйн О.И., Глазунова О.А., Малошенко Л.Г., Куликова Н.А., Королёва О.В. Сравнительный анализ лигнолитического потенциала базидиальных грибов, принадлежащих к различным таксономическим и экологическим группам // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2013. Т. 49, № 6. С. 570-576.
6. Glazunova O.A., Shakhova N.V., Psurtseva N.V., Moiseenko K.V., Kleimenov S.Y., Fedorova T.V. White-rot basidiomycetes *Junghuhnia nitida* and *Steccherinum bourdotii*: Oxidative potential and laccase properties in comparison with *Trametes hirsuta* and *Coriolopsis caperata* // *PLoS ONE*. 2018. Vol. 13(6). P. e0197667. DOI: /10.1371/journal.pone.0197667.
7. Кожемякина Н.В., Ананьева Е.П., Гурина С.В., Галынкин В.А. Условия культивирования, состав и биологическая активность мицелия *Fl. velutipes* (Fr.) P. Karst. // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2010. Т. 46, № 5. С. 583-586.
8. Алексеев А.В., Проскурнина Е.В., Владимиров Ю.В. Определение антиоксидантов методом активированной хемилюминесценции с использованием 2,2'-азо-бис(2-амидинопропана) // *Вестник Московского университета*. 2012. Т. 53, № 3. С. 187-193.
9. Uber T.M. Enzymes from basidiomycetes – Peculiar and efficient tools for biotechnology // *Biotechnology of Microbial Enzymes*. Academic Press. 2023. P. 129-164.

ВЛИЯНИЕ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ЦИТРАТОМ НАНОРАЗМЕРНОГО ДИОКСИДА ЦЕРИЯ НА ЭКСПРЕССИЮ ГЕНОВ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО МЕТАБОЛИЗМА В ЭМБРИОНАЛЬНЫХ ФИБРОБЛАСТАХ ЛЕГКИХ ЧЕЛОВЕКА

^{1,2}Проскурнина Е.В., ²Созарукова М.М., ¹Ершова Е.С.,
¹Савинова Е.А., ¹Каменева Л.В., ¹Вейко Н.Н., ¹Костюк С.В.

¹ФГБНУ «Медико-генетический научный центр имени академика Н.П. Бочкова», Москва,
e-mail: proskurnina@gmail.com, es-ershova@rambler.ru, savinova.ekaterina96@yandex.ru,
larisa.kameneva@yandex.ru, satelit32006@yandex.ru, svet-vk@yandex.ru;

²ФГБУН «Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова
Российской академии наук», Москва, e-mail: s_madinam@bk.ru

Цель исследования – изучить влияние стабилизированного цитратом наноразмерного диоксида церия на гены окислительного метаболизма в эмбриональных фибробластах легких человека в отношении жизнеспособности клеток, экспрессии белков NOX4 и NRF2, окислительного повреждения / репарации ДНК. Наночастицы получали термогидролизом гексанитратоцерата(IV) аммония и модифицировали путем постепенного добавления по каплям к раствору цитрата аммония. Определяли гидродинамический диаметр методом динамического рассеяния света и дзета-потенциал. Наночастицы культивировали с клетками в течение 1, 3, 24 и 72 ч. Для оценки выживаемости клеток использовали стандартный 72-часовой МТТ-тест (тест с 3-(4,5-диметилтиазол-2-ил)-2,5-дифенилтетразолийбромидом), на основании которого выбрали концентрации для исследования 5 нМ и 1,5 мкМ. Экспрессию белков определяли методом проточной цитометрии. Окислительное повреждение ДНК и уровень двухцепочечных разрывов оценивали по количеству 8-оксо-2'-дезоксигуанозина и фосфорилированного гистона γ H2AX. Активность систем репарации оценивали по экспрессии BRCA. Показано, что наночастицы проникают в клетки в течение 1–3 ч, что приводит к активации NOX4, NRF2 примерно в 2 раза по отношению к контролю, окислительному повреждению ДНК и двухцепочечным разрывам примерно в 1,8 раза по отношению к контролю и, как следствие, к активации систем репарации примерно в 3 раза; через 72 ч эти эффекты исчезали. Таким образом, стабилизированный цитратом наноразмерный диоксид церия можно рассматривать как вещество с краткосрочным противовоспалительным действием.

Ключевые слова: стабилизированный цитратом наноразмерный диоксид церия, NOX4, NRF2, окислительное повреждение ДНК

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 24-25-00088.

EFFECT OF CITRATE-COATED NANOCERIA ON THE EXPRESSION OF OXIDATIVE METABOLISM GENES IN HUMAN EMBRYONIC LUNG FIBROBLASTS

^{1,2}Proskurnina E.V., ²Sozarukova M.M., ¹Ershova E.S.,
¹Savinova E.A., ¹Kameneva L.V., ¹Veiko N.N., ¹Kostyuk S.V.

¹Research Centre for Medical Genetics named after Academician N.P. Bochkov, Moscow,
e-mail: proskurnina@gmail.com, es-ershova@rambler.ru, savinova.ekaterina96@yandex.ru,
larisa.kameneva@yandex.ru, satelit32006@yandex.ru, svet-vk@yandex.ru;

²Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, e-mail: s_madinam@bk.ru

The objective of the study was to investigate the effect of citrate-stabilized nanosized cerium dioxide on oxidative metabolism genes in human embryonic lung fibroblasts in terms of cell viability, NOX4 and NRF2 protein expression, and oxidative DNA damage/repair. Nanoparticles were obtained by thermal hydrolysis of ammonium hexanitrate(IV) cerate and modified by gradual dropwise addition to ammonium citrate solution. Hydrodynamic diameter and zeta potential were determined by dynamic light scattering. Nanoparticles were cultured with cells for 1, 3, 24, and 72 h. Standard 72-h MTT assay (3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyltetrazolium bromide assay) was used to assess cell survival, based on which concentrations of 5 nM and 1.5 μ M were selected for the study. Protein expression was determined by flow cytometry. Oxidative DNA damage and the level of double-strand breaks were assessed by the amount of 8-oxo-2'-deoxyguanosine and phosphorylated histone γ H2AX. The activity of repair systems was assessed by the expression of BRCA. It was shown that nanoparticles penetrate into cells within 1–3 hours, which leads to the activation of NOX4, NRF2 approximately twofold compared to the control, oxidative DNA damage and double-strand breaks approximately 1.8 times compared to the control and, as a result, the activation of repair systems approximately threefold; after 72 hours, these effects disappeared. Thus, citrate-stabilized nanoceria can be considered a substance with a short-term anti-inflammatory effect.

Keywords: citrate-coated nanoceria, NOX4, NRF2, oxidative DNA damage

The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation grant № 24-25-00088.

Введение

Последние достижения в области фармацевтической науки и практики привели к развитию новой области – нанофармацевтики, что делает актуальными проблемы качества, контроля эффективности и безопасности нанопрепаратов. Цито- и генотоксичность имеют особое значение для неорганических наночастиц, характеризующихся плохой биоразлагаемостью.

Наночастицы диоксида церия являются весьма перспективными нанофармпрепаратами благодаря своему уникальному взаимодействию с активными формами кислорода (АФК) [1]. Наноразмерный CeO_2 проявляет выраженные ферментоподобные (нанозимные) свойства, являясь миметиком супероксиддисмутазы (СОД), а также пероксидазы, каталазы, фосфатазы. Несмотря на многочисленные исследования, активность наноразмерного диоксида церия по отношению к генам изучена в основном на модели животных. По отношению к клеткам человека токсичность изучена, главным образом, на модели раковых клеток [2]. Исследования на культурах неопухолевых клеток относительно малочисленны (например, это работы по исследованию кератиноцитов кожи [3], пигментного эпителия сетчатки [4]). В целом, систематических исследований влияния диоксида церия на гены нормальных клеток человека, участвующих в окислительном метаболизме и регуляции ключевых АФК-зависимых сигнальных путей, не проводилось.

Цель исследования – изучить влияние стабилизированного цитратом наноразмерного диоксида церия на гены окислительного метаболизма в эмбриональных фибробластах легких человека в отношении: (1) жизнеспособности клеток, (2) экспрессии NOX4 и NRF2, (3) окислительного повреждения / репарации ДНК.

Материалы и методы исследования

Синтез и физико-химическая характеристика наночастиц CeO_2 . Нестабилизированный коллоидный раствор CeO_2 получали термогидролизом гексанитратоцерата(IV) аммония (#215473, Sigma) [5]. Концентрацию золя CeO_2 определяли термогравиметрическим методом. Раствор модификатора готовили путем растворения цитрата аммония (#247561, Sigma) в деионизированной воде. Модификацию наночастиц CeO_2 проводили путем постепенного добавления по каплям при непрерывном перемешивании не менее 30 мин водного раствора диоксида церия к раствору лиганда. Рентгенограммы образцов нанодисперсного CeO_2 были по-

лучены с помощью дифрактометра Bruker D8 Advance ($\text{CuK}\alpha$ -излучение, геометрия θ – 2θ). Идентификацию дифракционных максимумов осуществляли с использованием банка данных ICDD PDF2. Электронные изображения получали с помощью просвечивающего электронного микроскопа Leo 912 AB Omega (Carl Zeiss, Германия). Гидродинамический диаметр наночастиц измеряли с помощью анализатора Photocor Complex (Photocor, Россия). Для измерения дзета-потенциалов использовали Nano ZS Zetasizer (Malvern Panalytical, UK) в соответствии с ISO/TR 19997:2018.

Культивирование клеток. Эмбриональные фибробласты легких человека (4-й пассаж) рассеивали в концентрации $1,7 \times 10^4$ кл/мл в культуральной среде DMEM («Панэко», Россия), содержащей 1-% фетальную телячью сыворотку (РАА, Австрия), 50 ЕД/мл пенициллина, 50 мкг/мл стрептомицина и 10 мкг/мл гентамицина. Клетки культивировали при 37°C в течение 24 ч, далее добавляли наночастицы и инкубировали в течение 1, 3, 24 и 72 ч.

МТТ-тест. Для оценки выживаемости клеток проводили МТТ-тест (3-(4,5-диметилтиазол-2-ил)-2,5-дифенилтетразолий бромид). Флуоресценцию при 550 нм измеряли на планшетном ридере EnSpire (EnSpire Equipment, Финляндия). В качестве отрицательного контроля использовали клетки, инкубированные с культуральной средой и раствором цитрата в деионизированной воде. С наночастицами CeO_2 клетки инкубировали в течение 72 ч.

Проточная цитометрия. Клетки промывали раствором Версена (Thermo Fisher Scientific, США), обрабатывали 0,25%-ным трипсином («Панэко», Россия), промывали средой, суспендировали в фосфатном буферном растворе (PBS, pH 7,4) («Панэко», Россия), фиксировали параформальдегидом (Sigma-Aldrich, США) при 37°C в течение 10 мин, трижды промывали 0,5%-ным BSA-PBS, обрабатывали 0,1%-ным Triton X-100 в PBS в течение 15 мин при 20°C . Далее окрашивали конъюгированными антителами (1 мкг/мл) в течение 2 ч при комнатной температуре, промывали PBS и анализировали с помощью проточного цитометра (CytoFlex S, Beckman Coulter, США).

Результаты исследования и их применение

МТТ-тест. Результаты МТТ-теста свидетельствуют о том, что стабилизированный цитратом CeO_2 безопасен для клеток в широком диапазоне концентраций (рис. 1). Для дальнейших экспериментов выбраны концентрации 5 нМ и 1,5 мкМ.

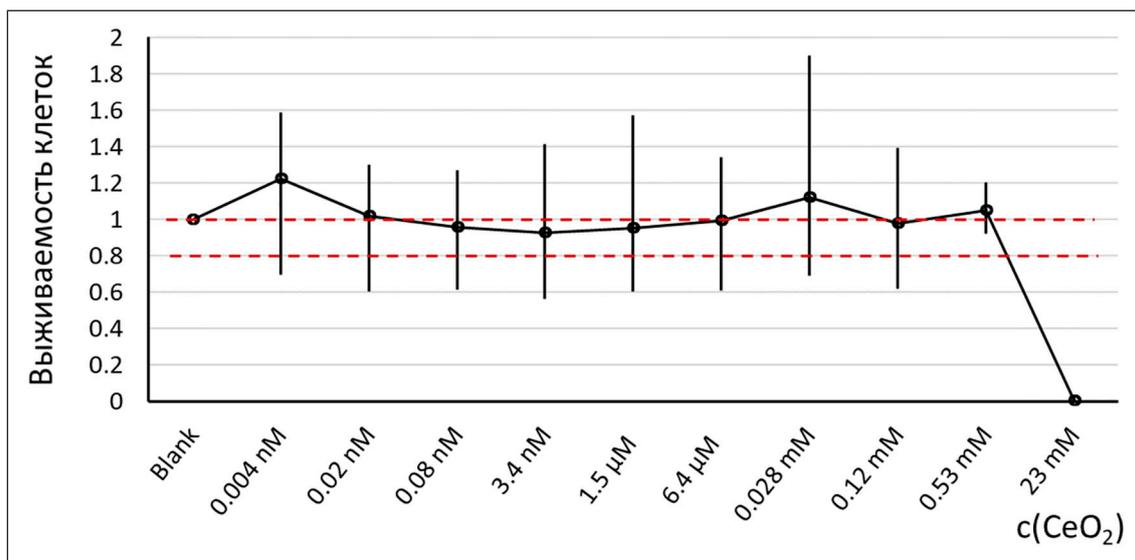


Рис. 1. Результаты 72-часового МТТ-теста. Пунктирными линиями отмечены линия контроля (выживаемость 1) и граница биологического эффекта (выживаемость клеток 0,8)

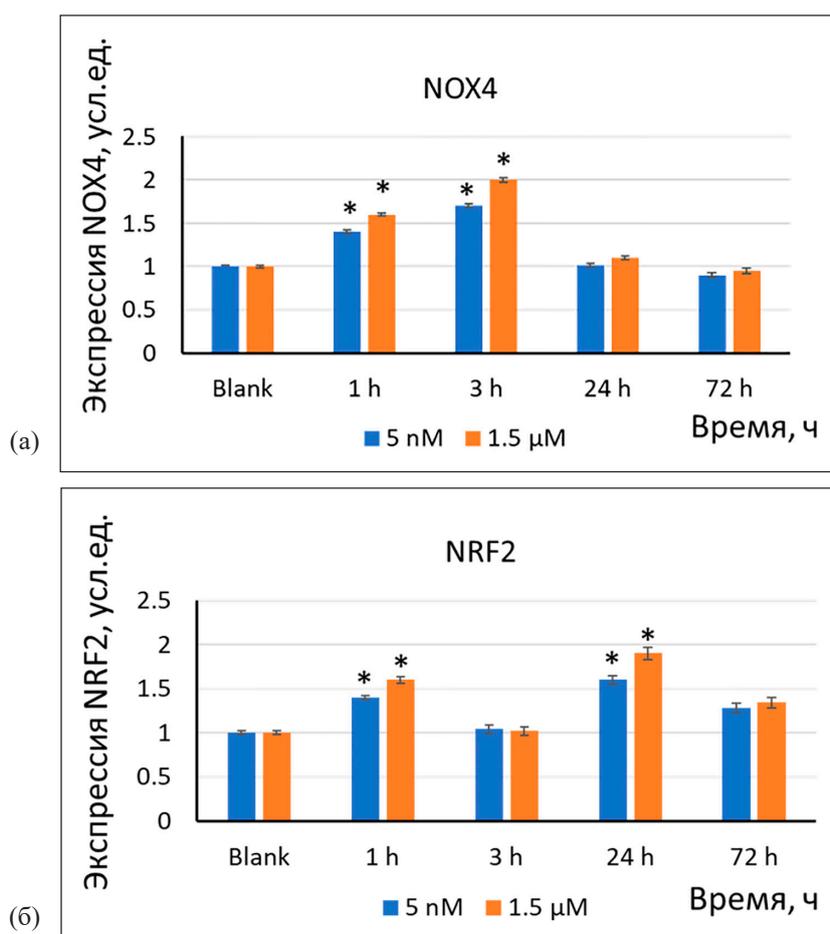


Рис. 2. Экспрессия белков (а) NOX4 (б) и NRF2 в результате инкубации клеток с наночастицами стабилизированного цитратом CeO_2 (5 нМ, 1,5 мкМ) в течение 1–72 ч. Значимые различия по критерию Манна–Уитни ($p < 0,05$) отмечены знаком *

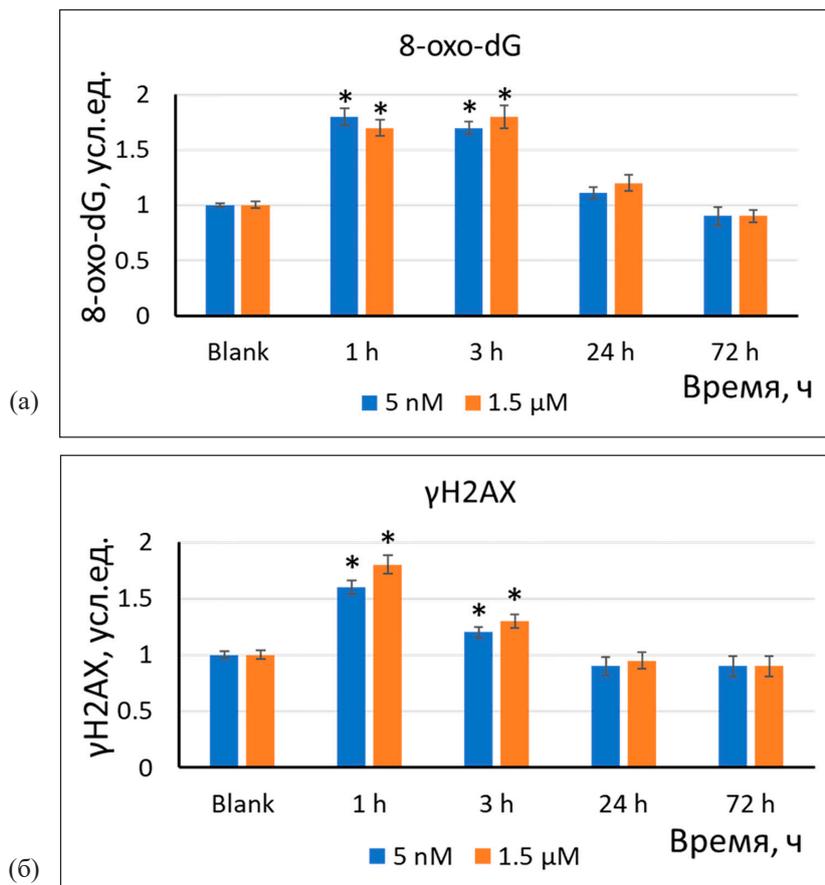


Рис. 3. Уровни (а) 8-охо-dG и (б) γH2AX в результате инкубации клеток с наночастицами стабилизированного цитратом CeO₂ (5 нМ, 1,5 мкМ) в течение 1–72 ч. Значимые различия по критерию Манна–Уитни ($p < 0,05$) отмечены знаком *

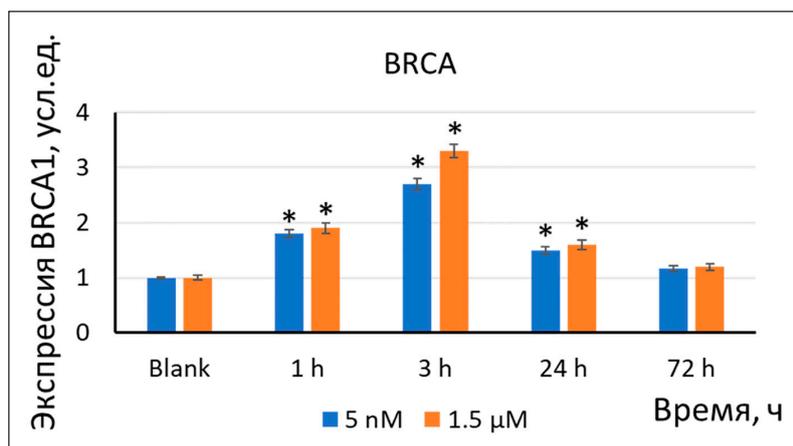


Рис. 4. Экспрессия белка BRCA1 в результате инкубации клеток с наночастицами стабилизированного цитратом CeO₂ (5 нМ, 1,5 мкМ) в течение 1–72 ч. Значимые различия по критерию Манна–Уитни ($p < 0,05$) отмечены знаком *

Экспрессия NOX4 и NRF2. Ключевыми источниками АФК в клетке являются НАДФН-оксидазы. Спустя 1–3 ч после добавления наночастиц к клеткам экс-

прессия белка NOX4 увеличилась в 1,4–2,0 раза (рис. 2а). Фактор транскрипции NRF2 участвует в антиоксидантном ответе. Экспрессия транскрипционного фактора

NRF2 увеличилась в 1,5–2 раза через 24 ч (рис. 2б). Кратковременная активность фактора NRF2, скорее всего, связана с высвобождением его из белковых комплексов с KEAP1 и фосфорилированием NRF2, депонированного в клетках. Повышение активности через 24 ч инкубации является результатом ответа на повышение экспрессии NOX4.

Окислительное повреждение и репарация ДНК. Спустя 1–3 ч инкубации клеток с наночастицами (5 нМ, 1,5 мкМ) уровень 8-оксо-2'-дезоксигуанозина (8-охо-dG), являющегося маркером окислительного повреждения ДНК, увеличился в 1,8–2,7 раза (рис. 3а). Увеличение 8-охо-dG может служить причиной разрывов ДНК. Уровень двухцепочечных разрывов ДНК был оценен по концентрации фосфорилированного гистона γ H2AX. Спустя 1 ч инкубации с наночастицами уровень γ H2AX увеличился в 1,5–1,8 раза, что коррелирует с изменениями 8-охо-dG (рис. 3б).

Уменьшение разрывов ДНК может быть обусловлено активацией генов, участвующих в репарации ДНК. Ключевым геном репарации является ген BRCA1. В результате действия наночастиц (5 нМ, 1,5 мкМ) на клетки через 1–3 ч экспрессия белка BRCA1 увеличилась в 1,5–3,5 раза (рис. 4). Увеличение экспрессии белка BRCA1 в течение 24 ч объясняет уменьшение двухцепочечных разрывов через 24–72 ч после добавления CeO_2 .

Основные результаты исследования можно суммировать следующим образом: 1) стабилизированный цитратом наноразмерный диоксид церия не проявляет токсичности по отношению к эмбриональным фибробластам легких человека в широком диапазоне концентраций до 0,53 мМ; 2) он быстро проникает в клетки в течение 1–3 ч, при этом увеличивается экспрессия NOX4 и NRF2; 3) увеличение экспрессии NOX4 приводит к окислительному повреждению ДНК и двухцепочечным разрывам, что, в свою очередь, активирует системы репарации; 4) как в низкой (5 нМ), так и в 300 раз более высокой концентрации (1,5 мкМ) наночастицы действуют примерно с одинаковой эффективностью. Эффекты диоксида церия развиваются довольно быстро – в течение 24 ч – и исчезают через 72 ч, что, предположительно, связано с удалением CeO_2 из клеток.

Цитрат-анион – широко используемый стабилизатор наночастиц. Несмотря на то что цитрат аммония – нейтральное вещество, но в качестве стабилизатора он может влиять на токсичность. Например, цитрат-стабилизированные наночастицы сере-

бра оказались более токсичными для кератиноцитов человека, чем стабилизированные полиэтиленгликолем [6]. Однако на клетках гепатомы наночастицы серебра, стабилизированные цитратом и полиэтиленгликолем, проявили схожую токсичность [7]. Кроме того, на токсичность влияет и способ приготовления суспензии. Цитратное покрытие не мешало связыванию олигонуклеотидов с золотыми наночастицами, однако большое количество цитрата на поверхности золотых частиц увеличивало их токсичность, хотя и не влияло на проникновение в эндотелиальные или эпителиальные клетки [8]. Авторами не найдено работ, посвященных оценке токсичности цитрат-стабилизированного диоксида церия по отношению к клеткам человека. На фибробластах мышей цитрат как стабилизатор диоксида церия проявлял токсичность по сравнению с полиакриловой кислотой [9]. Согласно полученным данным, цитрат как стабилизатор диоксида церия является безопасным, а цитрат-стабилизированные наночастицы проявляют в целом цитопротекторные свойства. Поскольку эффекты наночастиц развиваются достаточно быстро (в течение 1 ч), можно предположить, что цитрат не препятствует проникновению в фибробласты.

Наночастицы диоксида церия вызывают активацию экспрессии NOX4 [10]. Фермент NOX4 катализирует продукцию супероксидного анион-радикала и пероксида водорода, что ставит его в один ряд с важнейшими окислительно-восстановительными регуляторами. Повышение активности NOX4 приводит к активации противовоспалительного ответа NRF2, тем самым клетка защищается от повреждения. Негативный эффект NOX4 заключается в окислительном повреждении ДНК и возникновении двухцепочечных разрывов. В свою очередь, в ответ на повреждение ДНК происходит активация систем репарации.

Относительно токсичности и безопасности наноразмерного диоксида церия в литературе имеются противоречивые данные. Исследования на культурах альвеолярных эпителиальных клеток II типа у крыс свидетельствуют о провоспалительном и оксидативном действии диоксида церия [11]. В отношении клеток рака легких CeO_2 вызывал выраженный окислительный стресс, перекисное окисление липидов и повреждение мембран. Ченг с соавт. показали, что наночастицы CeO_2 вызывают повреждение и апоптоз в клетках гепатомы человека посредством окислительного стресса и активации сигнальных путей MAPK [12]. Токсическое действие CeO_2 на клетки аденокарциномы легких было продемон-

стрировано Митталом с соавт. [13]. Напротив, в исследовании клеток рака яичников и толстой кишки человека CeO_2 продемонстрировал антиоксидантные и противовоспалительные свойства [14]. Одновременное введение CeO_2 и ацетата свинца снижало генотоксичность, воспаление и образование АФК, восстанавливая целостность геномной ДНК [15].

Заключение

Активный участник биохимических реакций с участием АФК, диоксид церия проявляет свою окислительно-восстановительную активность в клетках, регулируя АФК-зависимые пути и активируя экспрессию NOX4. В течение 24 ч разворачивается каскад событий, включающий окислительную модификацию ДНК и двухцепочечные разрывы и одновременно активацию защитных систем: антиоксидантного пути NRF2 и систем репарации ДНК. Таким образом, стабилизированный цитратом диоксид церия можно рассматривать как вещество с кратковременным противовоспалительным действием.

Список литературы

1. Saifi M.A., Seal S., Godugu C. Nanoceria, the versatile nanoparticles: Promising biomedical applications // *J. Control Release*. 2021. Vol. 338. P. 164-189.
2. Lin W., Huang Y.W., Zhou X.D., Ma Y. Toxicity of cerium oxide nanoparticles in human lung cancer cells // *Int. J. Toxicol.* 2006. Vol. 25. No. 6. P. 451-457.
3. Ngoc L.T.N., Bui V.K.H., Moon J.Y., Lee Y.C. In-Vitro Cytotoxicity and Oxidative Stress Induced by Cerium Aminoclay and Cerium Oxide Nanoparticles in Human Skin Keratinocyte Cells // *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2019. Vol. 19. No. 10. P. 6369-6375.
4. Ma Y., Li P., Zhao L., Liu J., Yu J., Huang Y., Zhu Y., Li Z., Zhao R., Hua S., Zhu Y., Zhang Z. Size-Dependent Cytotoxicity and Reactive Oxygen Species of Cerium Oxide Nanoparticles in Human Retinal Pigment Epithelia Cells // *Int. J. Nanomedicine*. 2021. Vol. 16. P. 5333-5341. DOI: 10.2147/IJN.S305676.
5. Shcherbakov A.B., Teplonogova M.A., Ivanova O.S., Istomin S.Ya., Ivonin I.V., Baranchikov A.E., Ivanov V.V. Facile method for fabrication of surfactant-free concentrated CeO_2 sols // *Materials Research Express*. 2017. Vol. 4. No. 5. P. 055008.
6. Bastos V., Ferreira de Oliveira J.M., Brown D., Jonhston H., Malheiro E., Daniel-da-Silva A.L., Duarte I.F., Santos C., Oliveira H. The influence of Citrate or PEG coating on silver nanoparticle toxicity to a human keratinocyte cell line // *Toxicol Lett*. 2016. Vol. 249. P. 29-41.
7. Bastos V., Ferreira-de-Oliveira J.M.P., Carrola J., Daniel-da-Silva A., Duarte I., Santos C., Oliveira H. Coating independent cytotoxicity of citrate- and PEG-coated silver nanoparticles on a human hepatoma cell line // *J. Environ Sci (China)*. 2017. Vol. 51. P. 191-201.
8. Freese C., Uboldi C., Gibson M.I., Unger R.E., Weksler B.B., Romero I.A., Couraud P.-O., Kirkpatrick C.J. Uptake and cytotoxicity of citrate-coated gold nanospheres: Comparative studies on human endothelial and epithelial cells // *Part Fibre Toxicol*. 2012. Vol. 9. P. 23.
9. Ould-Moussa N., Safi M., Guedeau-Boudeville M.A., Montero D., Conjeaud H., Berret J.F. In vitro toxicity of nanoceria: effect of coating and stability in biofluids // *Nanotoxicology*. 2014. Vol. 8. No. 7. P. 799-811.
10. Guo S., Chen X. The human Nox4: gene, structure, physiological function and pathological significance // *J. Drug Target*. 2015. Vol. 23. No. 10. P. 888-896.
11. Schwotzer D., Niehof M., Schaudien D., Kock H., Hansen T., Dasenbrock C., Creutzenberg O. Cerium oxide and barium sulfate nanoparticle inhalation affects gene expression in alveolar epithelial cells type II // *J. Nanobiotechnology*. 2018. Vol. 16. No. 1. P. 16.
12. Cheng G., Guo W., Han L., Chen E., Kong L., Wang L., Ai W., Song N., Li H., Chen H. Cerium oxide nanoparticles induce cytotoxicity in human hepatoma SMMC-7721 cells via oxidative stress and the activation of MAPK signaling pathways // *Toxicol. In Vitro*. 2013. Vol. 27. No. 3. P. 1082-1088.
13. Mittal S., Pandey A.K. Cerium oxide nanoparticles induced toxicity in human lung cells: role of ROS mediated DNA damage and apoptosis // *Biomed. Res. Int*. 2014. Vol. 2014. P. 891934.
14. Vassie J.A., Whitelock J.M., Lord M.S. Endocytosis of cerium oxide nanoparticles and modulation of reactive oxygen species in human ovarian and colon cancer cells // *Acta Biomater*. 2017. Vol. 50. P. 127-141.
15. Mohamed H.R.H. Acute Oral Administration of Cerium Oxide Nanoparticles Suppresses Lead Acetate-Induced Genotoxicity, Inflammation, and ROS Generation in Mice Renal and Cardiac Tissues // *Biol. Trace Elem. Res*. 2022. Vol. 200. No. 7. P. 3284-3293.

СТАТЬЯ

УДК 615.322:57.084.1

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТРОЙ ТОКСИЧНОСТИ
НОВОГО ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ЭКСТРАКТА
БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ
РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ****Жукова О.Б., Зайцев К.В., Гостюхина А.А., Дорошенко О.С.,
Кожемякина А.Д., Степанова А.М., Гамеева Е.В.***ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр медицинской реабилитации
и курортологии Федерального медико-биологического агентства»,
Солнечногорск, e-mail: niikf@med.tomsk.ru*

Цель исследования: оценить острую токсичность нового электроимпульсного экстракта биологически активных веществ растительного происхождения, предназначенного для применения в клинической практике, при внутреннем введении лабораторным крысам. Экспериментальные испытания проводили на 60 половозрелых крысах линии Wistar обоего пола. 48 животным опытных групп тестируемый экстракт вводился однократно интражелудочно через зонд в разных дозах. Контрольную группу составили 12 крыс, получавших перорально эквивалентный объем воды очищенной. Через 14 суток наблюдения у грызунов оценивали наличие внешних признаков интоксикации, поведенческие реакции в тесте «открытое поле», в сыворотке крови измеряли концентрации общего белка, креатинина, глюкозы и холестерина, проводили некропсию внутренних органов. За весь период наблюдения гибели животных не зафиксировано. На основе сравнительной оценки результатов клинического наблюдения, измерения температуры тела, массы тела, определения показателей теста «открытое поле», биохимического анализа сыворотки крови, а также макроскопического осмотра состояния внутренних органов было установлено, что новый электроимпульсный экстракт биологически активных веществ растительного происхождения при интражелудочном введении не оказывает острого токсического действия на самок и самцов лабораторных крыс. Исследуемый экстракт соответствует умеренно опасным веществам.

Ключевые слова: доклинические исследования, токсичность, эксперимент, животные, электроимпульсный экстракт, класс опасности

**STUDY OF ACUTE TOXICITY OF A NEW ELECTROPULSE EXTRACT
OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES OF PLANT ORIGIN****Zhukova O.B., Zaitsev C.V., Gostyuhina A.A., Doroshenko O.S.,
Kozhemyakina A.D., Stepanova A.M., Gameeva E.V.***Federal Scientific and Clinical Center of Medical Rehabilitation and Balneology
of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Solnechnogorsk,
e-mail: niikf@med.tomsk.ru*

The purpose of the study: to evaluate the acute toxicity of a new electropulse extract of biologically active substances of plant origin, intended for use in clinical practice, when administered orally to laboratory rats. Experimental tests were conducted on 60 mature Wistar rats of both sexes. The test extract was administered to 48 animals of the experimental groups once intragastrically through a tube in different doses. The control group consisted of 12 rats that received an equivalent volume of purified water orally. After 14 days of observation, the rodents were assessed for external signs of intoxication, behavioral reactions in the open field test, the concentrations of total protein, creatinine, glucose and cholesterol were measured in the blood serum, and necropsy of internal organs was performed. No animal deaths were recorded during the entire observation period. Based on a comparative assessment of the results of clinical observation, measurement of body temperature, body weight, determination of the open field test parameters, biochemical analysis of blood serum, as well as macroscopic examination of the state of internal organs, it was established that the new electropulse extract of biologically active substances of plant origin, when administered intragastrically, does not have an acute toxic effect on female and male laboratory rats. The extract under study corresponds to moderately hazardous substances.

Keywords: preclinical studies, toxicity, experiment, animals, electropulse extract, hazard class

Введение

На современном этапе научно-технического прогресса с помощью высокотехнологических методов, включая использование технологии искусственного интеллекта, появились возможности масштабированного создания уникальных субстанций и синте-

тических молекул узконаправленного действия за достаточно краткосрочный период, не доступные разработчикам ранее. Однако клиническое применение новых фармакологических средств и материалов медицинского назначения по-прежнему требует научно обоснованных экспертиз и доказа-

тельств их безопасности и эффективности. В соответствии с действующими нормативно-правовыми актами для формирования доказанной в достаточной степени безопасности и эффективности необходимо многоэтапное научное исследование. При соблюдении установленного порядка на первоначальном этапе выполняется доклиническая оценка общей (острой и хронической) токсичности в условиях *in vitro* и *in vivo* на лабораторных животных.

Установление фактов наличия интоксикации и определение степени её выраженности при взаимодействии тестируемого вещества или изделия с живым организмом является важнейшей задачей доклинических токсикологических испытаний. Согласно Федеральному закону № 61 от 12 апреля 2010 года «Об обращении лекарственных средств» в ходе доклинических испытаний должна быть достигнута цель в получении достаточной доказательной базы о безопасности и эффективности применения новых средств и субстанций, с обязательной оценкой возможности и риска проведения на последующих этапах клинической апробации [1]. Доклинические исследования проводятся в строгом соответствии с Приказом Министерства здравоохранения Российской Федерации от 01 апреля 2016 года № 199н «Об утверждении Правил надлежащей лабораторной практики» [2].

В рамках выполнения прикладной научно-исследовательской работы «Разработка персонализированных технологий применения лечебных физических факторов и герпротекторов природного происхождения в коррекции биомаркеров старения» по государственному заданию № 84.002.24.800 авторами была разработана биологически активная добавка к пище на основе электроимпульсного экстракта из сырья растительного происхождения. Состав и технологическая схема извлечения данного экстракта (*ноу-хау*) подобраны таким образом, чтобы полученная композиция обладала выраженной адаптогенной активностью при внутреннем применении у лиц с факторами риска преждевременного старения организма и возраст-ассоциированных заболеваний.

В связи с вышеизложенным **целью данного исследования** явилась оценка острой токсичности нового электроимпульсного экстракта биологически активных веществ растительного происхождения, предназначенного для применения в клинической практике, при внутреннем введении лабораторным крысам.

Материалы и методы исследования

Исследование проводили на 60 половозрелых крысах линии Wistar обоего пола массой 240–300 г, полученных из сертифицированного питомника, которые после периода карантина (14 суток) содержались в стандартных условиях вивария Филиала ТНИИКиФ ФГБУ «ФНКЦ МРиК ФМБА» России при естественном световом режиме и на стандартном рационе со свободным доступом к воде и пище. Все процедуры с животными выполняли в соответствии с правилами и рекомендациями гуманного обращения с животными, используемыми для экспериментальных и иных научных целей (Приказ Минздрава России от 18 мая 2021 г. № 464н «Об утверждении Правил проведения лабораторных исследований») [3]. Исследование проводили согласно «Руководству по проведению доклинических исследований лекарственных средств» под редакцией А.Н. Миронова [4, с. 20–25]. Содержание животных и дизайн экспериментов одобрены Локальным этическим комитетом ФГБУ «ФНКЦ МРиК ФМБА» России после проведения независимой экспертизы на соответствие этическим нормам и принципам биомедицинских исследований (протокол № 3 от 28 марта 2024 г.).

Животных рандомизировали на контрольную и три опытные группы по 6 особей каждого пола. 48 животным опытных групп тестируемый экстракт вводился однократно внутривентриально через зонд в разных дозах. В соответствии с «Руководством по проведению доклинических исследований лекарственных средств» [4, с. 21] «...полученные результаты должны адекватно обеспечить возможность вычисления LD50 (доза, вызывающая гибель 50% особей), что предполагает наличие среди изучаемых групп одной группы со 100% летальностью и одной, в которой гибель животных отсутствует. Если из-за низкой токсичности фармакологического вещества нельзя определить LD50, следует указать максимальную дозу, которая была введена животным, но не менее 2 г/кг». Действуя согласно данному руководству, сначала животным ввели тестируемый экстракт в количестве 50 мг/кг и наблюдали за ними в течение трех суток. У этой группы крыс летальный исход и внешние признаки интоксикации отсутствовали. Далее для остальных групп последовательно применяли следующие дозы: 250, 500 и 2000 мг/кг. Контрольную группу составили 12 крыс, получавших перорально эквивалентный объем воды очищенной.

Общая продолжительность наблюдения за животными составила 14 суток. Ежедневно в ходе всего периода эксперимента фиксировали общее состояние животных, особенности их поведения, наличие и характер судорог, координации движений, тонус скелетных мышц, состояние шерстного и кожного покровов, окраску слизистых оболочек, количество и консистенцию фекальных масс, потребление корма и воды, изменение массы тела и температуры тела, с обязательной регистрацией сроков развития интоксикации и гибели животных. Через 14 суток наблюдения у крыс оценивали поведенческую активность в тесте «открытое поле» по методу C.S. Hall [5]. Далее животных выводили из эксперимента одномоментным декапитированием под CO_2 -наркозом, осуществляли забор крови для исследования, некропсию внутренних органов. В сыворотке крови проводили аналитические измерения концентраций общего белка, креатинина, глюкозы и общего холестерина с применением стандартных колориметрических методов согласно инструкциям производителя диагностических наборов (ООО «Ольвекс Диагностика», РФ) с помощью полуавтоматического фотометра «Biochem SA» (High Technology, США).

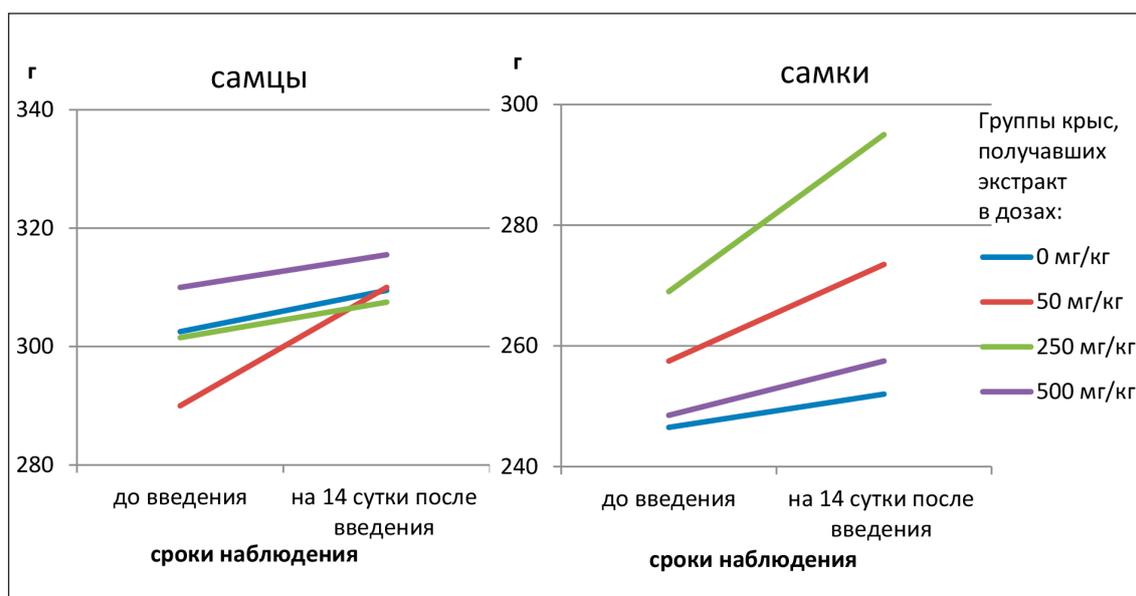
При обработке полученных данных были использованы автоматизированные методы статистического описания, включающие проверку на нормальность распре-

деления исследуемого признака по критерию Шапиро – Вилка, расчет медианы (M), верхнего и нижнего квартилей (Q_1 ; Q_3), а также методы проверки статистических гипотез при межгрупповом сравнении показателей с помощью непараметрического критерия Манна – Уитни. Различия считались статистически значимыми при уровне $p < 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе выполнения экспериментального исследования введение тестируемого вещества не привело к нарушению здоровья и гибели животных. Электроимпульсный экстракт биологически активных веществ растительного происхождения при внутрижелудочном однократном введении крысам в дозах 50, 250, 500 и 2000 мг/кг не вызывал смертность. Таким образом, установлена LD_{50} тестируемого экстракта более 2000 мг/кг, что согласно классификации [6] относится к умеренно опасным веществам (LD_{50} в диапазоне 151–5000 мг/кг).

Измерение температуры тела в динамике показало отсутствие пирогенной реакции у всех животных опытных групп на 1-е и 14-е сутки после однократного введения экстракта. Определение массы тела экспериментальных животных показало прибавку данного показателя в течение 14 суток эксперимента у крыс всех исследуемых групп (рисунок).



Динамика массы тела у крыс на 14-е сутки после однократного введения электроимпульсного экстракта биологически активных веществ растительного происхождения в разных дозах

Биохимические показатели сыворотки крови у крыс на 14-е сутки после введения электроимпульсного экстракта биологически активных веществ растительного происхождения, Me (Q₁; Q₃)

Исследуемые показатели		Контрольные крысы, получавшие очищенную воду	Опытные крысы, получавшие тестируемый экстракт в разной дозе:		
			50 мг/кг	250 мг/кг	500 мг/кг
Общий белок, г/л	самцы	71,0 (67,8; 94,5)	84,0 (80,8; 93,9) p≥0,05	73,2 (60,2; 83,1) p≥0,05	76,4 (63,8; 86,9) p≥0,05
	самки	71,5 (59,8; 85,0)	79,9 (76,6; 82,5) p≥0,05	77,3 (74,1; 79,8) p≥0,05	80,5 (47,8; 95,9) p≥0,05
Креатинин, мкмоль/л	самцы	42,0 (39,8; 54,8)	50,1 (43,1; 61,9) p≥0,05	49,8 (42,2; 57,3) p≥0,05	44,3 (40,9; 56,9) p≥0,05
	самки	48,0 (44,5; 60,0)	48,2 (45,2; 62,5) p≥0,05	55,3 (51,8; 70,6) p≥0,05	49,5 (40,7; 61,7) p≥0,05
Глюкоза, ммоль/л	самцы	5,3 (5,0; 5,9)	5,6 (5,3; 5,6) p≥0,05	4,3 (4,0; 4,7) p=0,011	5,3 (4,6; 6,0) p≥0,05
	самки	5,2 (4,7; 5,5)	4,9 (4,8; 5,0) p≥0,05	4,4 (3,9; 5,1) p=0,009	4,7 (4,0; 6,7) p≥0,05
Общий холестерин, ммоль/л	самцы	1,8 (1,7; 2,2)	2,5 (2,3; 2,7) p≥0,05	2,7 (2,5; 3,0) p=0,036	2,4 (1,6; 2,9) p≥0,05
	самки	1,9 (1,8; 2,0)	2,3 (2,2; 2,5) p≥0,05	3,0 (2,8; 3,3) p=0,019	2,7 (2,5; 3,1) p≥0,05

Примечание: p – уровень статистической значимости по сравнению с контрольной группой.

Сравнительный анализ показателей поведенческих реакций в тесте «открытое поле» на 14-е сутки после перорального применения экстракта выявил только учащение регистрации горизонтальной активности у самцов крыс, получавших 500 мг/кг тестируемого экстракта, на 60% (41,5 (34,3; 45,8) усл. ед., p=0,038) по сравнению со значением данного параметра у самцов контрольной группы (26,0 (13,5; 29,3) усл. ед.). Изменений других показателей, которые характеризуют ориентировочно-исследовательскую активность, зафиксировано не было. Тестирование самок крыс опытных групп в установке «открытое поле» на 14-е сутки после приема оцениваемого средства растительного происхождения не выявило изменений их поведенческих реакций относительно самок контрольной группы. Двигательная активность животных при помещении их в новые условия установки «открытое поле» свидетельствует об отсутствии у них стрессового состояния [7].

Результаты биохимического анализа показали, что у всех экспериментальных животных мужского и женского полов на 14-е сутки после внутреннего однократного приема разработанного нового экстракта в сыворотке крови показатели, характеризующие состояние белкового обмена веществ (концентрации общего белка и креатинина),

сопоставимы с уровнем аналогичных параметров у крыс, принимавших очищенную воду (таблица).

Проведенный биохимический анализ выявил меньшие значения скринингового показателя, характеризующего состояние углеводного обмена – содержание глюкозы в сыворотке крови – у крыс, получавших 250 мг/кг экстракта, вне зависимости от половой принадлежности (табл.). Со стороны липидного обмена отмечено небольшое повышение содержания общего холестерина также у животных данной опытной группы обоего пола (табл.). Считаем это несущественным изменением, т.к. в данном случае установленные уровни показателей не выходят за границы интервала референсных значений [8]. В целом, полученные результаты свидетельствуют об отсутствии грубых метаболических нарушений, сопровождающих токсическое поражение.

При макроскопическом изучении состояния внутренних органов после вскрытия патологических изменений у всех самцов опытных групп не обнаружено. Для половины крыс из группы с дозой тестируемого экстракта в 500 мг/кг отмечен визуально больший объем висцерального жира по сравнению с контрольной группой. При некропии у самок крыс всех групп патологических изменений также не выяв-

лено. Объём висцерального жира у всех животных женского пола был одинаков.

При обследовании желудка установлено, что у всех крыс обоего пола размеры его не изменены, границы ровные, серозная оболочка тонкая, блестящая, гладкая, нормально окрашена. Стенка желудка не изменена. Слизистая оболочка данного органа во всех случаях имела складчатую поверхность, соответствующую нормальному рельефу внутренней поверхности желудка, без эрозий и язв.

Заключение

В ходе проведения доклинических испытаний нового электроимпульсного экстракта биологически активных веществ растительного происхождения, разработанного для внутреннего применения, у 48 половозрелых крыс Wistar обоего пола при внутривенном введении объекта исследования в течение 14 суток наблюдения признаки общей интоксикации организма (летальный исход, нарушения дыхания, сердцебиения, пищеварения, параличи, судороги, тремор, недостаточность сердца, печени, почек, отек мозга, гипоксия и дистрофия тканей внутренних органов) отсутствовали, что свидетельствует о нетоксичности тестируемого экстракта.

На основе сравнительной оценки результатов клинического наблюдения, измерения температуры тела, массы тела, определения показателей теста «открытое поле», электрокардиографии, гематологического и биохимического анализов крови, а также макроскопического осмотра состо-

яния внутренних органов было установлено, что новый электроимпульсный экстракт биологически активных веществ растительного происхождения при внутреннем применении не оказывает острого токсического действия на самок и самцов лабораторных крыс. LD50 нового экстракта определен более 2000 мг/кг, что соответствует умеренно опасным веществам.

Список литературы

1. Федеральный закон от 12 апреля 2010 г. № 61-ФЗ (ред. от 02.08.2019) «Об обращении лекарственных средств» [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_99350/ (дата обращения: 12.10.2024).
2. Приказ Министерства здравоохранения РФ от 01 апреля 2016 г. №199н «Об утверждении Правил надлежащей лабораторной практики». М.: Стандартинформ, 2016. 9 с.
3. Приказ Министерства здравоохранения РФ от 18 мая 2021 г. N 464н «Об утверждении Правил проведения лабораторных исследований» [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202106010055> (дата обращения: 12.10.2024).
4. Руководство по проведению доклинических исследований лекарственных средств / под ред. А.Н. Миронова. Часть I. М.: Гриф и К, 2012. 328 с.
5. Ivinkis A. A study of validity of open-field measures // Austral. J. Psychol. 1970. Vol. 22. P. 175–183.
6. ГОСТ 12.1.007-76 Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. М.: Стандартинформ, 2017. 6 с.
7. Winciewicz D., Price J. Alterations of exploratory patterns induced by repeated stress // European Neuropsychopharmacology. 2019. Vol. 29. Is. 6. P. 361–362. DOI: 10.1016/j.euroneuro.2019.09.519.
8. Войтенко Н.Г., Макарова М.Н., Зуева А.А. Вариабельность биохимических показателей крови и установление референсных интервалов в доклинических исследованиях. Сообщение 1: крысы // Лабораторные животные для научных исследований. 2020. № 1. С. 47-53. DOI: 10.29296/2618723X-2020-01-06.

КЛИНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ

УДК 616-073.756.8:616.346.2-006

КОМПЬЮТЕРНО-ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ
КАРЦИНОИДА АППЕНДИКСА¹Азнауров В.Г., ²Азнаурова Н.К., ¹Кондратьев Е.В.¹ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр хирургии имени А.В. Вишневского»
Минздрава России, Москва, e-mail: vaznaurov@ya.ru;²ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова»
Минздрава России (Сеченовский университет), Москва

Данное клиническое наблюдение приведено с целью совершенствования знаний в области медицинской визуализации новообразований аппендикса. Будут рассмотрены практические аспекты визуализации карциноида аппендикса методом мультиспиральной компьютерной томографии, вопросы отражения обнаруженных изменений в протоколе описания исследования. Пациент в настоящем клиническом наблюдении длительное время предъявлял жалобы на боли в правом боку постоянного характера с иррадиацией в правую паховую область, повышенную утомляемость, снижение аппетита. Проведенные ранее инструментальные исследования, в том числе колоноскопия, не обнаружили никаких патологических изменений. Однако по результатам повторной компьютерной томографии было выявлено объемное новообразование в червеобразном отростке. Впоследствии данное новообразование было хирургически удалено и гистологически верифицировано как нейроэндокринная опухоль. Новообразования аппендикса в целом редки и относительно малоизучены. Среди новообразований червеобразного отростка наиболее распространены нейроэндокринные опухоли, называемые также карциноидами. Тем не менее в отечественной литературе незаслуженно мало внимания уделяется лучевой диагностике новообразований этой локализации. В силу вариантной анатомии и топографии червеобразного отростка визуализация и дифференциальная диагностика любых изменений в нем может быть затруднена.

Ключевые слова: мультиспиральная компьютерная томография, нейроэндокринная опухоль, карциноид аппендикса, червеобразный отросток

COMPUTED TOMOGRAPHY IMAGING OF APPENDICEAL CARCINOID

¹Aznaurov V.G., ²Aznaurova N.K., ¹Kondratiev E.V.¹A.V. Vishnevsky National Medical Research Center of Surgery of the Ministry of Health of Russia,
Moscow, e-mail: vaznaurov@ya.ru;²I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of Russia
(Sechenovskiy University), Moscow

This clinical observation is given in order to improve knowledge in the field of medical imaging of appendix neoplasms. Practical aspects of imaging of the appendix carcinoid by multispiral computed tomography, issues of reflecting the detected changes in the protocol of the study description will be considered. The patient in the present clinical observation complained for a long time of constant pain in the right side with irradiation to the right inguinal region, increased fatigue, decreased appetite. Previous instrumental studies, including colonoscopy, did not reveal any pathological changes. However, according to the results of repeated computed tomography, a volumetric neoplasm in the vermiform process was revealed. Subsequently, this neoplasm was surgically removed and histologically verified as a neuroendocrine tumor. Neoplasms of the appendix are generally rare and relatively poorly studied. Among the neoplasms of the appendix, neuroendocrine tumors, also called carcinoids, are the most common. Nevertheless, in the Russian literature, undeservedly little attention is paid to the radiation diagnosis of neoplasms of this localization. Due to the variant anatomy and topography of the appendix, visualization and differential diagnosis of any changes in it may be difficult.

Keywords: multispiral computed tomography, neuroendocrine tumor, carcinoid of the appendix, vermiform appendix

Введение

Распространенность опухолей аппендикса невелика и составляет до 1,4% всех злокачественных опухолей [1]. Это редкие опухоли желудочно-кишечного тракта, которые могут проявляться симптомами аппендицита, болью в правом нижнем квадранте передней стенки живота или пальпируемой массой. Большинство новообразований данной локализации состоят из первичных эпителиальных новообразований и нейроэндокринных опухолей (НЭО). Эпителиальные

новообразования – муцинозные и немучинозные – чаще обнаруживаются при визуализации, чем НЭО, из-за их большего размера и склонности к метастазированию по брюшине [2]. Компьютерно-томографическая (КТ) визуализация первичных опухолей аппендикса может быть ошибочно расценена как острый аппендицит, особенно в силу частого применения КТ в ургентной хирургии [3]. Кроме того, сама опухоль может вызвать острый аппендицит, скрывая первопричину жалоб [4]. Порядка 75% НЭО располагаются

в краевых отделах аппендикса, и 25% близ его основания, при достаточном объеме опухоли она может облитерировать просвет аппендикса и привести к острому аппендициту. Другие новообразования, включая лимфому, саркому, мезенхимальные опухоли, или вторичное злокачественное поражение аппендикса, встречаются редко [5].

Лучевая диагностика таких образований зачастую затруднена по ряду причин, первой из которых является вариантная анатомия червеобразного отростка. Как известно, червеобразный отросток имеет 8 вариантов расположения, и нередко эта анатомическая структура пропускается рентгенологом при изучении томограммы. Помимо этого, в случае астенического (т.е. при малом объеме абдоминальной жировой клетчатки) телосложения пациента, аппендикс вообще может быть не дифференцирован от прилегающих к нему тканей; известную трудность в обнаружении аппендикса на томограмме представляют собой различные послеоперационные изменения в брюшной полости, в первую очередь спайки.

Цель исследования – совершенствование визуализации новообразований червеобразного отростка на примере карциноидной опухоли и алгоритма работы врача-рентгенолога в диагностике изменений толстой кишки методом КТ.

Материалы и методы исследования

Пациент 39 лет мужского пола обратился в НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского в начале 2024 года с жалобами на боли в правом боку постоянного характера с иррадиацией в правую паховую область, повышенную утомляемость, снижение аппетита. Пациента длительное время беспокоят вышеописанные жалобы, обследовался по месту жительства – данных за органическую патологию органов брюшной полости нет.

Однако в последнее время боли усилились. Применялась консервативная терапия с кратковременным эффектом.

Исследование было выполнено на 64-срезовом компьютерном томографе Ingenuity CT производства компании Philips, Нидерланды. Контрастное вещество (КВ) «ОМНИПАК 350» производства компании GE HEALTHCARE в объеме 100 мл было введено внутривенно через катетер, установленный на правом предплечье. Протокол сканирования включал в себя исследование без контрастного усиления, а также артериальную, портальную и отсроченную фазы контрастного усиления. Изучение КТ-изображений проводилось в медицинской информационной системе «Архимед».

Пациент предоставил письменное информированное согласие на участие в исследовании и публикацию анонимизированных КТ-изображений его исследования.

Результаты исследования и их обсуждение

Клиническое наблюдение

Пациент обратился с клинической картиной длительных болей неясного генеза в правом нижнем квадранте передней стенки живота. По результатам обследования по месту жительства – эзофагогастродуоденоскопия от декабря 2023 года: «Очаговый гастрит. Терминальный эрозивный эзофагит В по ЛА классификации». Колоноскопия от декабря 2023: «Долихосигма. Патологических изменений не выявлено».

КТ органов брюшной полости (ОБП) от декабря 2023: «Локальное расширение петли тонкой кишки, в динамике его разрешение. Дополнительных образований, инфильтратов в брюшной полости не выявлено».

Далее пациенту была выполнена МСКТ (мультиспиральная компьютерная томография) ОБП с внутривенным контрастированием в отделении лучевой диагностики НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского. Из протокола описания МСКТ от января 2024 года: «Червеобразный отросток расположен ретроцекально. В дистальной трети аппендикс утолщен до 11 мм, в просвете гиперваскулярное образование протяженностью до 20 мм. Плотность измененного участка по фазам: нативная – 40 НУ, артериальная – 120 НУ, венозная – 115 НУ, отсроченная – 70 НУ. Гиперваскулярный очаг до 3 мм в верхушке аппендикса. Регионарная клетчатка не изменена. Лимфатические узлы по ходу a.ileocolica до 6 мм. Заключение: гиперваскулярное образование червеобразного отростка (карциноид?). Ретроцекальное положение аппендикса».

Таким образом, было установлено входящее ретроцекальное положение червеобразного отростка (рис. 1) и точно локализована опухоль, не указанная при МСКТ в стороннем учреждении в исследовании от декабря 2023 года. Предположительно опухоль не распространялась на соседствующие ткани в силу достаточно ровных и гладких контуров и отсутствия тяжести окружающей абдоминальной жировой клетчатки, специфической для инвазивных изменений. Специфических изменений регионарных лимфатических узлов также не было отмечено. Отмечено выраженное контрастирование опухоли при введении КВ в артериальную и портальную фазы контрастирования (рис. 2).

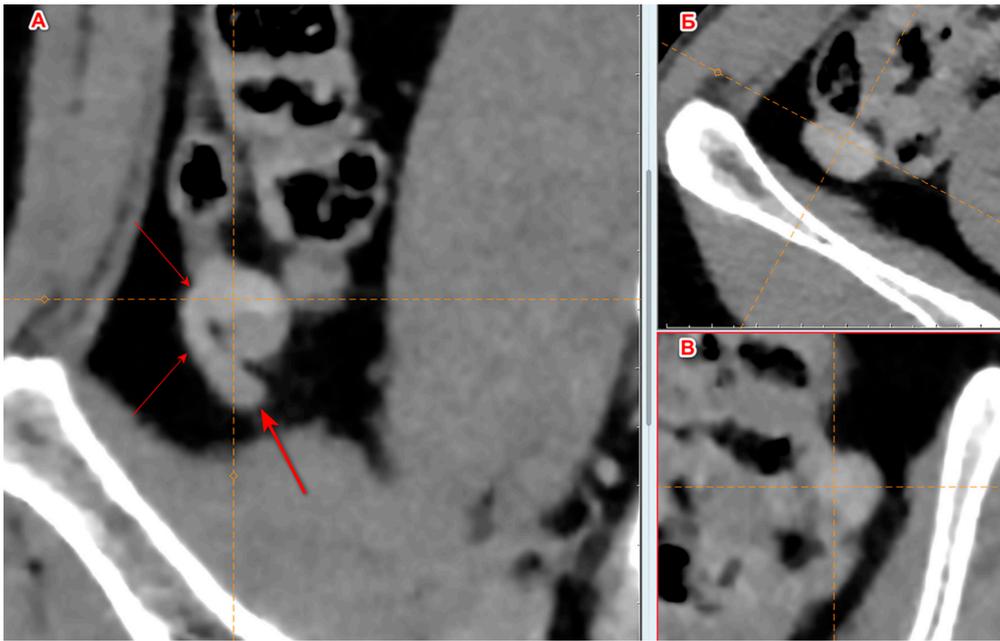


Рис. 1. Компьютерная томография, мультипланарная реконструкция, артериальная фаза контрастирования: А – кософронтальная проекция, Б – аксиальная проекция, В – боковая (сагиттальная) проекция. Тонкие стрелки – опухоль аппендикса, толстая стрелка – неизмененный аппендикс

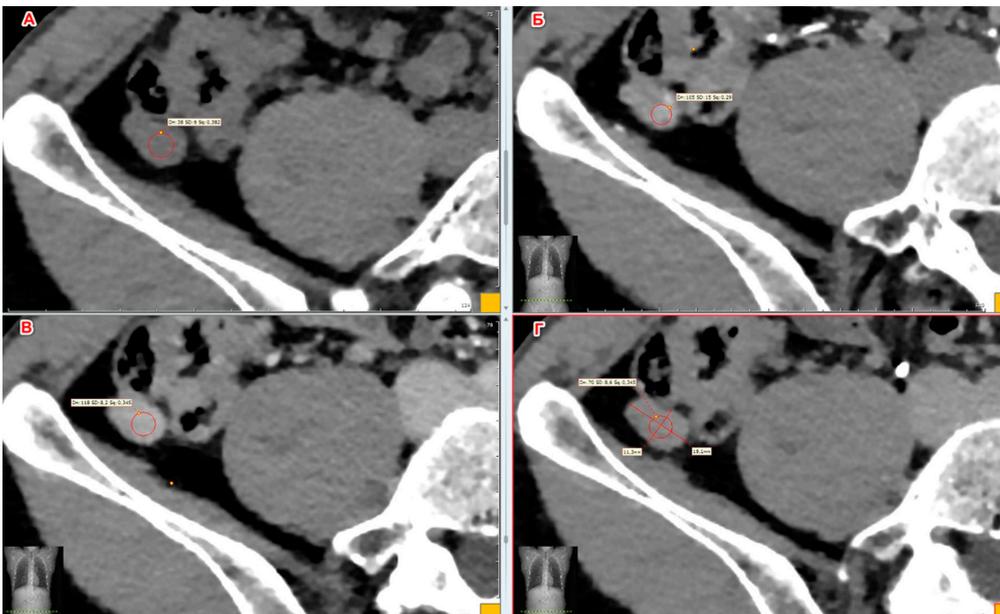


Рис. 2. Компьютерная томография, аксиальные проекции: А – преконтрастное сканирование, Б – артериальная фаза контрастирования, В – портальная фаза контрастирования, Г – отсроченная фаза контрастирования. Круглые метки – region of interest с указанием КТ-чисел исследуемой области (Dn), установлены на опухоли

Далее пациенту была выполнена операция «Лапароскопическая резекция купола слепой кишки. Биопсия брюшины левой подвздошной области. Дренирование

брюшной полости» в январе 2024 года, в ходе которой был также обнаружен участок спаечного процесса между сигмовидной кишкой и брюшиной, из этой об-

ласти дополнительно была взята биопсия. Из протокола оперативного вмешательства: «Произведена ревизия органов брюшной полости: выпота в брюшной полости нет, брюшина гладкая, блестящая, печень коричневого цвета, в размерах не увеличена. Желчный пузырь неизменен. Петли тонкой и толстой кишки, желудок, без патологических изменений. Далее выполнена мобилизация червеобразного отростка и купола слепой кишки. Червеобразный отросток утолщен в дистальном отделе, серозная оболочка не изменена. С помощью сшивающего аппарата выполнена резекция купола слепой кишки с червеобразным отростком. В левой подвздошной области отмечается локальный спаечный процесс между стенкой сигмовидной кишки и передней брюшной стенкой. Для верификации процесса при помощи эндоскопических ножниц выполнена биопсия участка измененной брюшины и сращений данной области размером 6x8 мм».

По результатам планового гистологического исследования от января 2024 г. (результаты совпали со срочным гистологическим исследованием): «высокодифференцированная нейроэндокринная опухоль (карциноид) аппендикса, Grade 1. Опухоль удалена целиком, в крае резекции купола слепой кишки – без элементов опухоли»; «в резецированном участке брюшины элементов опухоли не обнаружено. Имеются слабо выраженные признаки воспалительной реакции».

Пациент был выписан под наблюдение по месту жительства без осложнений.

Актуальность точной лучевой диагностики в визуализации опухолей аппендикса очень высокая. Как видно из настоящего наблюдения, никакие инструментальные методы не выявили проблему до проведения МСКТ с контрастным усилением. Ультразвуковое исследование может быть сильно ограничено избыточной пневматизацией кишечника. Магнитно-резонансная томография может применяться в случае невозможности применения КТ, к примеру при беременности пациентки. Колоноскопия, при всей информативности метода, не исследует червеобразный отросток, за исключением его устья. А при выполнении в стороннем учреждении в декабре 2023 года КТ-исследования ОБП, опухоль дифференцировалась, однако не была указана в протоколе описания, что еще раз подтверждает трудности в выявлении патологии данной области, особенно у пациентов астенического и нормального телосложения.

КТ является одним из основных диагностических методов для выявления ап-

пендикса и диагностики любого имеющегося заболевания. Диагностика аппендицита с помощью КТ имеет чувствительность и специфичность 87% и 76% соответственно [6]. Какова рентгенологическая семиотика данной опухоли? Как правило, функционирующие опухоли имеют небольшой размер, что затрудняет их диагностику. Нефункциональные опухоли, как правило, имеют больший размер, преимущественно овальной либо шаровидной формы [7]. С точки зрения КТ-диагноста, принципиальным моментом является накопление опухолью контрастного вещества, отражающее ее васкуляризацию и позволяющее визуально отличить опухоль от неизмененных тканей. Для функционирующих опухолей свойственно быстрое накопление контрастного вещества в позднюю артериальную фазу и умеренное вымывание в венозную фазу контрастирования. В настоящем исследовании применялись ранняя артериальная фаза и портальная фаза контрастирования. Как следствие, в артериальную фазу контрастирования образование накопило КВ не всем объемом, и в портальную фазу накопление КВ сохранилось (до 120 единиц Hounsfield в артериальную и 118 единиц Hounsfield в портальную фазы контрастирования). В отсроченную фазу контрастирования НЭО аппендикса, как и остальных локализаций, медленно вымывает контрастное вещество (70 единиц Hounsfield в настоящем исследовании). В случае нормального или астенического телосложения пациента опухоль малых размеров может практически не дифференцироваться на исследовании без контрастного усиления, так как аппендикс, скорее всего, будет компримирован прилегающими к нему внутренними органами. Протокол сканирования обязательно должен включать в себя бесконтрастное сканирование, и по меньшей мере артериальную и портальную/венозную фазы контрастного усиления. Стандартизованного протокола описаний таких опухолей не существует, однако, по рекомендациям Европейского общества нейроэндокринных опухолей (The European Neuroendocrine Tumor Society; ENETS), должен включать число, размеры каждого поражения в мм, указание на форму, наличие или отсутствие кальцинатов и характеристики контрастного усиления [8]. Дифференциальная диагностика карциноида аппендикса должна включать такие патологии, как аппендицит, другие новообразования аппендикса, такие как муцинозная цистаденокарцинома – наиболее распространенное злокачественное новообразование аппендикса, а также рак толстой кишки.

Заключение

Своевременная диагностика и лечение опухолей аппендикса остается актуальным вопросом современной российской и мировой медицины. Вышеприведённое наблюдение ярко иллюстрирует трудность в первичном выявлении опухолевого процесса. Будучи самой распространенной опухолью аппендикса, НЭО не демонстрирует специфической клинической и рентгенологической картины, часто скрываясь за симптомами аппендицита. Знание особенностей анатомии, онконастороженность в отношении червеобразного отростка помогут значительно сократить срок процесса диагностики и приступить к лечению, как правило, путём удаления опухоли. В то же время ошибки интерпретации и недостаточное внимание к исследуемой области, в том числе и за счет трудности поиска червеобразного отростка на компьютерно-томографических изображениях, могут привести к неоправданной задержке начала лечения и страданиям больного, которых можно было бы избежать.

Список литературы

1. Hatch Q.M., Gilbert E.W. Appendiceal Neoplasms // *Clin. Colon Rectal Surg.* 2018. Vol. 31. No 5. P. 278-287.
2. Leonards L.M., Pahwa A., Patel M.K., Petersen J., Nguyen M.J., Jude C.M. Neoplasms of the Appendix: Pictorial Review with Clinical and Pathologic Correlation // *Radiographics.* 2017. Vol. 37. No 4. P. 1059-1083. DOI: 10.1148/rg.2017160150.
3. Karande G.Y., Chua W.M., Yiin R.S.Z., Wong K.M., Hedgire S., Tan T.J. Spectrum of computed tomography manifestations of appendiceal neoplasms: acute appendicitis and beyond // *Singapore Med. J.* 2019. Vol. 60. No. 4. P.173-182. DOI: 10.11622/smedj.2019035.
4. Васильева М.А., Дибиров М.Д., Молчанова П.Е., Свитина К.А., Соколова Е.А., Магомедалиев А.М. Реактивный аппендицит у пациентки с опухолью слепой кишки. Клинический случай // *Инфекции в хирургии.* 2018. № 1-2. С. 126-129.
5. Radha S., Afroz T., Satyanarayana G. Primary marginal zone B-cell lymphoma of appendix // *Indian J Pathol Microbiol.* 2008. Vol. 51. No. 3. P. 392-394. DOI: 10.4103/0377-4929.42523.
6. Iamwat J., Teerasamit W., Apisarntharak P., Noppak-unsomboon N., Kaewlai R. Predictive ability of CT findings in the differentiation of complicated and uncomplicated appendicitis: a retrospective investigation of 201 patients undergone appendectomy at initial admission // *Insights Imaging.* 2021. Vol. 12. No. 143. DOI: 10.1186/s13244-021-01086-3.
7. Madrid Lewis M.S., Manjarres Guevara A.E., Madrid Jaramillo J.A., Campana Granda C.M. Innovative imaging approaches for neuroendocrine tumor characterization: Combined dual energy CT and perfusion protocol implementation // *Radiol Case Rep.* 2024. Vol. 19. No. 10. P. 4225-4231. DOI: 10.1016/j.radcr.2024.06.063.
8. Dromain C., Vullierme M.P., Hicks R.J., Prasad V., O'Toole D., de Herder W.W., Pavel M., Faggiano A., Kos-Kudla B., Öberg K., Krejs G.J., Grande E., Niederle B., Sundin A. ENETS standardized (synoptic) reporting for radiological imaging in neuroendocrine tumours // *J. Neuroendocrinol.* 2022. Vol. 34. No. e13044. DOI: 10.1111/jne.13044.

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 616-001.18:612.592:612.017.2

**ОСОБЕННОСТИ ДЕЙСТВИЯ И ПОСЛЕДСТВИЯ ВЛИЯНИЯ
ГИПОТЕРМИИ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА.
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ ГИПОТЕРМИИ
В МЕДИЦИНЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЙ**

**Корсиков Н.А., Калинин Д.А., Перепелица И.Н., Долгатов А.Ю.,
Лепилов А.В., Бобров И.П., Долгатова Е.С., Бабкина А.В.**

*ФГБОУ ВО «Алтайский государственный медицинский университет» Минздрава России,
Барнаул, e-mail: rector@agmu.ru*

Температура окружающей среды является одним из главных абиотических факторов, обеспечивающих выживаемость биологических организмов. Действие низких температур приводит к развитию адаптационных реакций, направленных на сохранение гомеостаза. При холодом воздействии важно поддерживать постоянную температуру тела. Срыв теплового гомеостаза негативно действует на организм, что приводит не только к физиологической, биохимической реорганизации, но и морфологическим изменениям тканей организма. Данный литературный обзор посвящен изучению влияния гипотермии на организм человека, перспективам применения искусственной гипотермии в медицине. В рамках исследования проведен подбор, анализ представленной в свободном доступе литературы, результатов исследований, связанных с воздействием низких температур на организм человека. Основная сложность анализа, представленного в свободном доступе материала, – отсутствие стойкой структурированности исследований, их узкая направленность. В ходе подготовки работы было подобрано и проанализировано более 50 источников научной информации, из которых 29 было использовано в данной работе. Дана характеристика условиям, температурным границам, точкам воздействия на организм низких температур. Работа построена с учетом звеньев этиопатогенеза воздействия низких температур на различные системы органов организма человека. Структурирован материал, посвященный практическому применению гипотермии в медицине: в качестве антикоагулянта при заболеваниях сердечно-сосудистой системы, для предотвращения формирования тромбов, в качестве нейропротектора при поражениях головного мозга, при гипертермии – для снижения температуры тела. Данный вопрос является весьма актуальным, однако требует дальнейшего изучения в экспериментальных условиях.

Ключевые слова: человек, организм, гипотермия, холодовая травма, стресс, адаптация

**FEATURES OF ACTION AND CONSEQUENCES OF HYPOTHERMIA
ON THE HUMAN BODY. PROSPECTS FOR THE APPLICATION
OF ARTIFICIAL HYPOTHERMIA IN MEDICINE OF EXTREME SITUATIONS**

**Korsikov N.A., Kalin D.A., Perepelitsa I.N., Dolgatov A.Yu.,
Lepilov A.V., Bobrov I.P., Dolgatova E.S., Babkina A.V.**

*Altai State Medical University of the Ministry of Health of Russia, Barnaul,
e-mail: rector@agmu.ru*

Environmental temperature is one of the main abiotic factors ensuring the survival of biological organisms. The effect of low temperatures leads to the development of adaptive reactions aimed at maintaining homeostasis. When exposed to cold, it is important to maintain a constant body temperature. Disruption of thermal homeostasis has a negative effect on the body, which leads not only to physiological and biochemical reorganization, but also to morphological changes in body tissues. This literature review is devoted to the study of the effect of hypothermia on the human body, the prospects for the use of artificial hypothermia in medicine. As part of the study, a selection and analysis of freely available literature and research results related to the effects of low temperatures on the human body were carried out. The main difficulty in analyzing the material presented in the public domain is the lack of a stable structure of research and its narrow focus. During the preparation of the work, more than 50 sources of scientific information were selected and analyzed, of which 29 were used in this work. The characteristics of the conditions, temperature limits, and points of exposure to low temperatures on the body are given. The work is structured taking into account the links in the etiopathogenesis of the effects of low temperatures on various organ systems of the human body. The material is structured on the practical use of hypothermia in medicine – in diseases of the cardiovascular system, hypothermia acts as an anticoagulant, preventing the formation of blood clots, as a neuroprotector in case of brain damage, or simply to reduce temperature during hyperthermia. This issue is very relevant but requires further study under experimental conditions.

Keywords: person, organism, hypothermia, cold injury, stress, adaptation

Введение

Переохлаждение организма и развивающиеся в последующем патологические изменения на сегодняшний день являются

актуальной темой для дальнейшего изучения. По архивным данным в стране за 1983-1992 гг., зарегистрировано 122175 случаев насильственной смерти, в том числе

5557 человек погибли от воздействия низких температур. За период с 2004 по 2013 г. показатель смертности от низких температур составил 6,6 [1]. Проблема воздействия холода на организм человека характерна для многих регионов Российской Федерации, в особенности расположенных в северных широтах. Лица, которые могут подвергаться влиянию холода, зачастую не сразу способны распознать первые признаки переохлаждения. Данная ситуация может быть связана как с недостаточной оценкой погодных условий, так и с тяжестью состояния человека [2].

Основными причинами, которые лежат в основе развития переохлаждения являются: нахождение в состоянии алкогольного или наркотического опьянения, шоковые состояния, патологии со стороны центральной нервной системы и сердечно-сосудистой системы, нарушение обмена веществ, патология со стороны центра терморегуляции [3].

Цель исследования: подбор, анализ и систематизация представленной в свободном доступе литературы, посвященной изучению влияния гипотермии на организм человека.

Материалы и методы исследования

В рамках исследования были проведены анализ и обобщение литературных данных, проведен сравнительный анализ полученной информации, обобщены результаты исследования, сформулированы выводы. В исследовании использовались полнотекстовые варианты статей, находящиеся в открытой печати и опубликованные за последние 15 лет в отечественных научных изданиях, а также статьи, имеющие свободный доступ в электронных ресурсах. Поиск научных источников основывался на отборе теоретического материала, содержащего данные, соответствующие теме нашего литературного обзора. Использованы базы данных научной электронной библиотеки eLibrary.ru, научной электронной библиотеки «КиберЛенинка», Российской государственной библиотеки (РГБ), Национальной электронной библиотеки (НЭБ).

Приспособление к изменяющимся условиям окружающей среды является одним из основных свойств организма. Воздействие сильных раздражителей, таких как низкие температуры, действующие длительное время, приводит к формированию адаптивных изменений, направленных на сохранение жизненно важных процессов и структур организма [4-6].

Подавляющее большинство территорий России находится в экстремальных клима-

тических условиях с критически низкими температурами и частыми их перепадами, что определяет повышенные требования к компенсаторно-приспособительным механизмам организма [7].

Низкая температура окружающей среды является стрессором, продолжительное действие которого вызывает не только биохимические, но морфологические изменения в организме. Реакция на гипотермию регулируется нейроэндокринной системой, которая выполняет многочисленные функции, в том числе направленные на поддержание теплового гомеостаза. Срыв механизмов тепловой регуляции чреват гибелью организма [8].

Влияние гипотермии на систему гемостаза и сердечно-сосудистую систему

Плазменный и сосудисто-тромбоцитарный гемостаз в условиях гипотермического воздействия может изменяться как в сторону гипокоагуляции, что может привести к развитию кровотечений и кровоизлияний, так и в сторону гиперкоагуляции, что может стать причиной внутрисосудистого тромбообразования [9].

Холод является своего рода активатором внутренних механизмов гемокоагуляции, что способствует тромбообразованию и формированию ишемии. Отличительной особенностью холодовой ишемии является замедление процессов клеточной дегидратации при действии низкой температуры до некоторого предела, определяющего границу обратимости ишемии при обморожениях конечностей. Также при холодовой травме возрастает способность тромбоцитов к адгезии [10].

Наиболее частым изменением коагуляционных свойств крови под действием холода является сдвиг в сторону гипокоагуляции за счет угнетения клеточного и плазменного звеньев системы гемостаза. Наряду с этим возможно снижение количества тромбоцитов, что отражается на процессах репарации тканей организма, особенно при наличии сопутствующих повреждений и заболеваний [11].

Системное воздействие гипотермии на кровообращение было описано Д.Б. Деминым. Низкие температуры, несомненно, запускают процессы адаптации в организме, что приводит к значимым изменениям в системной гемодинамике. Так, при воздействии холода наблюдается вазоконстрикция сосудов кожи. Это своего рода первый этап защиты организма. В таких условиях происходит перераспределение кровотока, вследствие чего повышается артериальное

давление. В ответ на повышение артериального давления возникает барорефлекс, обуславливающий снижение частоты сердечных сокращений [12].

Все системы организма тесно связаны между собой: изменения в одном звене могут в полной мере отразиться на других. При повышении тонуса сосудов в ответ на гипотермию снижается уровень вентилиционно-перфузионного отношения, что приводит к развитию гипоксии. Кратковременное воздействие холода сопровождается повышением тормозных влияний коры на подкорковые структуры мозга вследствие снижения количества медиаторов. Низкие температуры приводят к активации симпатoadреналовой системы, что способствует увеличению частоты сердечных сокращений, увеличению сердечного выброса, повышению кровяного давления и уровня глюкозы [13].

Стоит отметить изменения в системе кровообращения, наблюдающиеся при долговременной адаптации. Наблюдается брадикардия, снижение сердечного выброса, системного артериального давления и общего сосудистого периферического сопротивления. Отсюда можно сделать вывод, что при частом и длительном действии холодового фактора организм стремится уменьшить реактивность системы кровообращения затем, чтобы уменьшить влияние на сердце и на организм в целом.

Активация адаптивных реакций организма, связанная с централизацией кровообращения, приводит к спазму периферических сосудов, вследствие этого возникает большой риск формирования тромбов с последующими осложнениями в виде тромбозов и тромбозов жизненно важных органов [14].

Повышение тонуса периферического сосудистого русла лежит в основе развития гипоксии. Нарушение трофики тканей и органов зачастую приводит к необратимым изменениям в их структурах. Например, длительная гипоксия способствует формированию новых сосудов, как правило, несовершенных, в последующем происходит разрастание соединительной ткани и еще большее ухудшение трофики, что в итоге приведет к некрозу [15].

Гипотермия оказывает прямое повреждающее действие на сосудистую стенку. В результате деструктивных изменений стенки сосудов происходит перераспределение кровотока и изменение его характеристик, как правило, это касается скорости и объема, что неблагоприятно сказывается на перфузии органов и усугубляет гипоксию [16].

При гистологическом исследовании сосуды полнокровны, отмечается лейкоцитарная инфильтрация, возможны очаги кровоизлияний в близлежащие структуры. Увеличение числа свободных радикалов ведет к неизбежным изменениям структуры и функций клеток. Эндотелиоциты набухают, ядра становятся пикнотичными [17; 18].

Влияние гипотермии на почки

Рассматривая макроскопические изменения, наблюдающиеся под действием гипотермии в почках, обращают внимание на точечные кровоизлияния, выявленные в слизистой оболочке чашечек почечных лоханок. Патоморфологические изменения, наблюдающиеся в почках в результате гипотермии, проявляются в виде нарушений почечного кровообращения – выраженным полнокровием капилляров клубочков и сосудов как коркового, так и мозгового слоев. Вследствие гипотермического повреждения и возникновения изменений в сосудах возникает гипоксическое повреждение нефроцитов, формируются инфаркты почки, что приводит к развитию острого почечного повреждения. Увеличивается количество нефроцитов с нечеткими контурами и пикнотичными ядрами, определяются клетки с признаками плазмокоагуляции и кариолизиса [19; 20].

Влияние гипотермии на эндокринную систему

На воздействие холода, как и на большинство стрессовых ситуаций, надпочечники отвечают усилением биосинтеза стероидных гормонов и катехоламинов. Действие данных гормонов заключается во влиянии на энергетическое обеспечение клеток, а также в адаптации к стрессовым ситуациям. Катехоламины усиливают сердечную деятельность, сужают артериолы внутренних органов, уменьшают потоотделение, что направлено на уменьшение теплоотдачи и сохранение тепла в организме, а также стимулируют гликогенолиз в печени и мышцах, глюконеогенез и протеолиз в печени, липолиз в жировой ткани – все это способствует накоплению энергии и тепла в теле человека.

В ходе проведенных клинических исследований реакции аденогипофиза на гипотермию выявлены следующие особенности: сосуды полнокровны, просветы расширены, суммарная площадь капилляров увеличена, эритроциты плотно прилегают друг к другу, отграничено от паренхимы, просветы сосудов деформированы. При длительном воздействии низких температур наблюдается большое количество крупного размера

хлорофиллов, что может свидетельствовать об усиленном функционировании аденогипофиза [21]. В ответ на экстремальные факторы внешней среды адаптация организма происходит через активацию симпатoadrenalовой и гипоталамо-гипофизо-надпочечниковой систем.

Терапевтическая гипотермия

Краниocereбральная гипотермия – это метод, который основывается на снижении температуры мозга у животных и человека вследствие преобладания теплоотдачи над теплопродукцией. Механизм данной процедуры направлен на снижение жизнедеятельности организма, повышение устойчивости к кислородному голоданию, предотвращение отека головного мозга в результате воздействия факторов внешней среды.

Краниocereбральная гипотермия один из перспективных методов лечения при остром нарушении мозгового кровообращения, а также один из методов скрининга при патологиях головного мозга, терапии внутриутробной гипоксии [22].

Использование гипотермии в терапевтических целях является фактором, который способен прервать каскад патогенетических нарушений и снижать осложнения поражения мозга, так как исключает фазу вторичного энергодифицита и апоптоза нейронов. Терапевтическая гипотермия является своего рода физической нейропротекцией при интранатальной асфиксии новорожденных детей. В условиях соблюдения техники и режимов проведения данной процедуры она значительно снижает тяжелые осложнения со стороны центральной нервной системы, а также уменьшает риск инвалидности детского возраста [23].

Снижение температурных показателей нейрона на 1 °C снижает метаболические процессы в головном мозге примерно на 10%. Терапевтическая гипотермия не только снижает перфузию головного мозга, но и в большей степени замедляет метаболизм, что опосредует становление равновесия. Также следует выделить тот факт, что гипотермия обладает благоприятным действием на внутричерепное давление, кровоток в целом [24].

Механизм защитного действия гипотермии заключается в уменьшении потребности кислорода клетками мозга, перераспределении метаболизма, снижении накопления молочной кислоты. Кроме того, гипотермия играет важную роль в профилактике повреждения гематоэнцефалического барьера. Гипотермия предотвращает активацию протеаз, которые, в свою оче-

редь, ответственные за деградацию матрикса. Терапевтическая гипотермия предотвращает повреждение гематоэнцефалического барьера, снижая продукцию матриксных металлопротеиназ, подавляя их активности. Применение гипотермии может оказывать влияние на апоптоз клеток. Это может наблюдаться в отношении как каспазозависимого, так и каспазозависимого пути апоптоза. Умеренная гипотермия оказывает свое действие на внутренний путь апоптоза путем изменения экспрессии белков Bcl-2, уменьшения продукции и выброса цитохрома C, ингибирования активности каспаз. Также при влиянии гипотермии наблюдается угнетение внешнего пути апоптоза за счет снижения экспрессии белков FAS и FASL [25].

Следует добавить еще несколько очень важных эффектов, оказываемых гипотермией на организм. А именно, изменение интенсивности метаболизма в клетках способствует уменьшению выделения молочной кислоты и глутамата, как следствие, значительно снижает выраженность ацидоза и повреждающего действия перечисленных выше факторов. Помимо этого, гипотермия воздействует на белки-аквапорины, что может способствовать улучшению микроциркуляции после восстановления кровообращения. Что касается микроциркуляторного русла, то низкие температуры не обошли его стороной, влияние на него характеризуется снижением количества нейтрофилов. Все перечисленные воздействия воспринимаются неоднозначно и могут быть использованы в лечебных целях, например при ишемическом инсульте, что было описано в работе Е.И. Фартакова [26].

Особенности действия общей гипотермии терапевтического характера на сосуды головного мозга у пациентов с острым нарушением мозгового кровообращения характеризуются угнетением процессов коагуляции, что способствует подавлению образования тромбов в сосудистом русле головного мозга. Под действием низких температур наблюдается снижение потребности головного мозга в кислороде и глюкозе, что способствует профилактике ишемического повреждения клеток [27].

Краниocereбральная гипотермия является своего рода методом локального охлаждения, в первую очередь направленным на систему терморегуляции головного мозга, что позволяет использовать его в качестве терапии лихорадочных состояний. К второстепенным эффектам данного вида гипотермии можно отнести: снижение внутричерепного давления, купирование отека и стабилизации гемодинамики головного мозга [28].

Также гипотермия, реализуя генетические механизмы, влияет на формирование цитопротективного фенотипа нейронов, преимущественно за счет экспрессии генов реагирования. Экспрессия генов, в свою очередь, способствует активации фактора транскрипции индуктора фактора роста, а также нейротрофических факторов, синтеза белков стресс-реакций (шаперонов) [29].

Заключение

Нахождение организма человека, животных в условиях гипотермического воздействия может привести к выраженным метаболическим и функциональным нарушениям. При этом особое значение приобретает физиологическое состояние органов, непосредственно участвующих в поддержании гомеостаза организма. Низкая температура как неблагоприятный фактор воздействия на организм представляет серьезную угрозу для его адекватной жизнедеятельности. Влияние низкой температуры на клетку оказывается прямым и опосредованным действием, приводящим к ряду гомеостатических изменений на клеточном и субклеточном уровнях. Гипотермия способствует развитию патоморфологических реакций во многих системах организма человека: центральной нервной, сердечно-сосудистой, системе гемостаза, эндокринной, пищеварительной системе. Критическое воздействие холода приводит к жизнеугрожающим состояниям, связанным с повреждениями, формирующимися в вышеуказанных системах органов, что может приводить к летальному исходу. Но помимо повреждающего воздействия гипотермии на организм, можно выделить и положительные стороны. В настоящее время гипотермия начинает активно применяться в клинической практике при лечении заболеваний сердечно-сосудистой системы, нервной системы.

Таким образом, анализ литературных данных показывает, что в литературе имеется небольшое количество работ, посвященных патоморфологическим изменениям в органах при гипотермии и адаптивных компенсаторно-приспособительных процессах, происходящих при действии этого важного повреждающего фактора. Также следует отметить, что патоморфологические исследования, проведенные при изучении вопроса гипотермии, в большинстве работ имеют описательный характер. Вопросы количественного анализа структурных проявлений реакций приспособления и компенсации, содержащие в себе ключ к углубленному пониманию адаптационных процессов, до конца не изучены.

Список литературы

1. Пиголкин Ю.И., Солодовников В.И., Кислов М.А., Оганесян Н.С. Сравнительная эпидемиология термической травмы и гипотермии // Судебно-медицинская экспертиза. 2021. № 64 (2). С. 4-9. DOI: 10.17116/sudmed2021640214.
2. Чудаков А.Ю., Толмачёв И.А., Гайворонская В.В., Шимараева Т.Н., Рогозин С.С. Сочетанное влияние физического переутомления с алкогольным опьянением на развитие смерти от острого общего глубокого акцидентального переохлаждения (судебно-медицинские и физиологические аспекты): Научный доклад. Серия книг: Теория и методика профессионального обучения и воспитания взрослых. СПб.: Институт интегративной медицины, 2022. 16 с.
3. Алябьев Ф.В., Парфирьева А.М., Чесалов Н.П., Шамагин Ю.А., Осипов А.И. Функционально-морфологические изменения сердца при гипотермии // Сибирский медицинский журнал. 2011. № 1. С. 68-71.
4. Долгатов А.Ю., Бобров И.П., Корсинов Н.А., Долгатова Е.С., Бабкина А.В., Лепилов А.В., Лушников Е.Л., Бакарев М.А. Динамика плоидометрических и морфометрических показателей ядер гепатоцитов человека в зависимости от интенсивности переохлаждения // Современные проблемы науки и образования. 2023. № 4. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=32748> (дата обращения: 15.09.2024). DOI: 10.17513/spno.32748.
5. Бобров И.П., Лепилов А.П., Долгатов А.Ю., Корсинов Н.А., Гулдаева З.Н., Крючкова Н.Г., Соседова М.Н., Долгатова Е.С., Лушников Е.Л., Бакарев М.А. Тучные клетки миокарда при воздействии гипотермии // Современные проблемы науки и образования. 2021. № 5. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=31160> (дата обращения: 15.09.2024). DOI: 10.17513/spno.31160.
6. Гулдаева З.Н., Бобров И.П., Лепилов А.В., Долгатов А.Ю., Крючкова Н.Г., Фоминых С.А., Малинина Е.И., Альимова Е.Е., Соседова М.Н., Лушников Е.Л., Бакарев М.А., Молодых О.П. Ретроспективный анализ патоморфологических изменений в легких у людей, погибших от смертельной гипотермии // Бюллетень медицинской науки. 2019. Т. 14, № 2. С. 38-44.
7. Бочаров М.И. Терморегуляция организма при холодных воздействиях (обзор). Сообщение II // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Медико-биологические науки. 2015. № 2. С. 5-16.
8. Кубасов Р.В. Гормональные изменения в ответ на экстремальные факторы внешней среды // Вестник Российской академии медицинских наук. 2014. № 9-10. С. 102-109.
9. Филиппов Е.С., Гомелля М.В., Зарубин А.А., Михеева Н.И., Белогорова Т.А., Иванова О.Г. Влияние управляемой умеренной гипотермии на гемостаз у новорожденных с гипоксически-ишемической энцефалопатией // Клиническая лабораторная диагностика. 2017. № 12. С. 745-749. DOI: 10.18821/0869-2084-2017-62-12-745-749.
10. Шаповалов К.Г., Сизоненко В.А., Витковский Ю.А. Изменения адгезивной функции лимфоцитов к тромбоцитам при местной холодовой травме // Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук. 2007. № 5. С. 182-183.
11. Воронина А.Е., Кувайцева Ю.С. Роль гипотермии в реабилитации пациентов после оперативного вмешательства на окологлазничной области // Оренбургский медицинский вестник. 2021. № 4. С. 14-18.
12. Дёмин Д.Б., Кривоногова Е.В., Кривоногова О.В., Поскотинова Л.В., Горенко И.Н. Исследование динамики уровня салivarного кортизола при оценке сердечно-сосудистых реакций на общее холодное воздействие // Журнал медико-биологических исследований. 2020. № 2. С. 121-131. DOI: 10.37482/2542-1298-Z002.
13. Дёмин Д.Б., Поскотинова Л.В., Кривоногова Е.В., Кривоногова О.В., Овсянкина М.А. Роль сеансов кардиоуправления в формировании нейрофизиологических реакций на экспериментальное общее охлаждение ор-

- ганизма человека // Журнал медико-биологических исследований. 2019. Т. 7, № 3. С. 261-271. DOI: 10.17238/issn2542-1298.2019.7.3.261.
14. Чипигина Н.С., Виноградова Т.Л., Тимофеев В.Т., Большакова М.А., Барышева С.А. Поражение почек при инфекционном эндокардите // Клиницист. 2008. № 4. С. 16-23.
15. Лисянская О.Ю. Гипоксия – ведущий фактор прогрессирования хронической болезни почек // Почка. 2016. № 1 (15). С. 64-66.
16. Тумаева Т.С., Герасименко А.В., Науменко Е.И., Рязина И.Ю. Гемодинамика почек в раннем периоде адаптации у детей, рожденных путем операции кесарева сечения. 2016. Т. 95. № 1. С. 35-40.
17. Степанян Ю.С. Дифференциально-диагностический комплекс гистоструктуры щитовидной железы при смерти от общей гипотермии на основе методов квантификации // Медицинская экспертиза и право. 2013. № 2. С. 5-7.
18. Алябьев Ф.В., Арбыкин Ю.А., Серебров Т.В., Яушев Т.Р., Вогнерубов Р.Н., Мельникова С.Ю., Воронков С.В., Логвинов С.В. Морфофункциональные изменения внутренних органов и некоторых биохимических показателей в динамике общего переохлаждения организма // Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины. 2014. № 29 (2). С. 71-74. DOI: 10.29001/2073-8552-2014-29-2-71-74.
19. Чугунова О.Л., Гуревич А.И., Шумилина М.В. Артериальный тромбоз редкой локализации – инфаркт почки у детей // Российский вестник перинатологии и педиатрии. 2011. Т. 56, № 5. С. 115-119.
20. Арбыкин Ю.А., Алябьев Ф.В., Янковский В.Э., Агеева Т.А. Динамика ультраструктурных изменений почек при общем переохлаждении организма // Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины. 2015. № 30 (3). С. 65-68. DOI: 10.29001/2073-8552-2015-30-3-65-68.
21. Степанян Ю.С. Морфофункциональные эквиваленты реакции аденогипофиза на гипотермию // Проблемы экспертизы в медицине. 2006. Т. 6, № 1 (21). С. 12-13.
22. Чебоксаров Д.В., Бунтина М.А., Гарабова Н.И., Бутров А.В., Шевелев О.А., Веснин С.Г., Седанкин М.К. Возможности краниocereбральной гипотермии и радиотермокартирования для диагностики и лечения острого нарушения мозгового кровообращения // Здоровье и образование в XXI веке // Здоровье и образование в XXI веке. 2014. Т. 16, № 2. С. 42-43.
23. Бочкова Л.Г., Бабенкова Д.Г. Терапевтическая гипотермия в неонатологии // Российский вестник перинатологии и педиатрии. 2020. № 4. С. 227-228.
24. Бутров А.В., Торосян Б.Д., Чебоксаров Д.В., Махмутова Г.Р. Терапевтическая гипотермия при поражениях головного мозга различного генеза // Вестник интенсивной терапии имени А.И. Салтанова. 2019. № (2). С. 75-81. DOI: 10.21320/1818-474X-2019-2-75-81.
25. Григорьев Е.В., Шукевич Д.Л., Плотников Г.П., Тихонов Н.С. Терапевтическая гипотермия: возможности и перспективы // Клиническая медицина. 2014. № 9. С. 9-16.
26. Скворцов В.В., Скворцова Е.М., Бангаров Р.Ю. Лактат-ацидоз в практике врача – анестезиолога-реаниматолога. Вестник анестезиологии и реаниматологии. 2020. № 17(3). С. 95-100. DOI: 10.21292/2078-5658-2020-17-3-95-100.
27. Бутров А.В., Торосян Б.Д., Чебоксаров Д.В., Махмутова Г.Р. Терапевтическая гипотермия при поражениях головного мозга различного генеза // Вестник интенсивной терапии имени А. И. Салтанова. 2019. № 2. С. 75-81. DOI: 10.21320/1818-474X-2019-2-75-81.
28. Аваков И.А. Шахова Повышение эффективности неинвазивной краниocereбральной гипотермии // Вестник экстренной медицины. 2011. № 4. С. 13-17.
29. Шевелев О.А., Саидов Ш.Х., Петрова М.В., Чубарова М.А., Усманов Э.Ш. Краниocereбральная гипотермия как метод терапии нарушений температурного баланса головного мозга у пациентов в посткоматозном периоде // Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация. 2020. № 2(1). С. 11-19. DOI: 10.36425/rehab2041.

ВЛИЯНИЕ ДОННОГО МИКРОРЕЛЬЕФА НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ПО ДАННЫМ ПОДВОДНЫХ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЙ

Анисимов И.М.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва,
e-mail: oceanbreak@gmail.com*

Целями исследования являются оценка влияния перепадов донного микро рельефа на погрешность измерений и определение критериев применимости метода измерений с использованием лазерной масштабной линейки. В работе описаны методы оценки погрешности измерений при видеосъемке морского дна с буксируемого аппарата. Исследовалась ошибка в измерении длины объектов при отклонении их от идеальной плоскости. Видеоматериалы были получены с помощью буксируемого необитаемого подводного аппарата «Видеомодуль», а 3D-модели были построены в программе Agisoft Metashape. Аппроксимация плоскости дна выполнялась методом наименьших квадратов, после чего рассчитывалось отклонение точек поверхности дна от аппроксимирующей плоскости для оценки точности измерений. Результаты показали, что метод аппроксимации дна плоскостью обеспечивает высокую точность измерений на ровных участках. Однако при наличии крупных объектов на дне точность значительно снижается, что требует применения трехмерной реконструкции для более сложных рельефов. По результатам работы сделан вывод о том, что аппроксимация дна справедлива для ровных участков без высоких объектов, тогда как на рельефных участках для повышения точности целесообразно применять методы трехмерной реконструкции.

Ключевые слова: системы подводного видения, исследования поверхности дна, обработка изображений, фотограмметрия

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0024).
Обработка видеоизображений выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-17-00156).*

INFLUENCE OF SEAFLOOR MICRORELIEF ON MEASUREMENT ERROR FROM UNDERWATER VIDEO DATA

Anisimov I.M.

*Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Science, Moscow,
e-mail: oceanbreak@gmail.com*

The purpose of this work is to evaluate the influence of bottom microrelief gradients on the measurement error and to determine the applicability criteria of the measurement method using a laser scale bar. The paper describes the methods of estimation of measurement error in video survey of the seafloor from a towed vehicle. The error in measuring the length of objects when they deviate from the plane was investigated. Video data were obtained using the towed unmanned underwater vehicle Videomodule, and 3D models were built in the Agisoft Metashape program. The bottom plane approximation was performed using the least squares method, after which the deviation of the bottom surface points from the approximating plane was calculated to assess the accuracy of the measurements. The results showed that the method of bottom plane approximation provides high accuracy of measurements in flat areas. However, in the presence of large objects on the bottom, the accuracy is significantly reduced, which requires the use of 3D reconstruction for more complex reliefs. According to the results of the work it is concluded that the bottom approximation is valid for flat areas without high objects, while in relief areas it is advisable to apply three-dimensional reconstruction methods to improve accuracy.

Keywords: underwater vision systems, seafloor studies, image analysis, photogrammetry

The work was carried out within the framework of the state assignment of the IO RAS (topic No. FMWE-2024-0024). Video image processing was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 23-17-00156).

Введение

Визуальные исследования поверхности дна являются неотъемлемой частью комплексных океанологических изысканий и позволяют решать широкий спектр задач. Они включают изучение структуры и численности донных сообществ, анализ морфологических характеристик донных осадков, а также выявление признаков подводной разгрузки природных газов и флюи-

дов, что имеет особое значение в контексте поиска и оценки месторождений полезных ископаемых. Эти исследования помогают оценить биологическое разнообразие, особенности распространения и функционирования экосистем, а также определить состояние морских биоресурсов и наличие возможных загрязнений.

Для визуализации поверхности дна широко используются буксируемые аппараты,

оснащенные высококачественными фото- и видеокамерами, направленными вниз, перпендикулярно движению аппарата [1, 2]. Такая ориентация позволяет проводить точную съемку донного рельефа, обеспечивая оптимальное качество изображения и минимизируя влияние мутности воды и прочих помех. Получаемые таким образом фото- и видеоизображения представляют собой своеобразный аналог аэросъемки, но со значительно меньшим охватом площади. Это обеспечивает возможность детального анализа локальных участков дна и дает важную информацию о мелкомасштабных особенностях морфологии и распределения живых организмов.

Для детального анализа подводных видеозаписей выполняется параметризация полученных изображений: производятся подсчет площади поверхности дна, видимой в кадре, а также измерения отдельных участков грунта, природных или техногенных объектов. Одним из самых распространенных методов измерения является применение лазерной масштабной линейки: на поверхность дна с помощью системы параллельных лазерных указателей проецируются яркие отметки, расположенные на известном расстоянии друг от друга (в простейшем случае это две отметки). Данный способ измерения прост в реализации на аппаратном и программном уровне, однако его применение возможно лишь в том случае, если рассматриваемый участок дна достаточно ровный. В этом случае участок дна можно условно считать плоским, что сводит процедуру измерения к сравнению размеров интересующих участков дна с расстоянием между лазерными отметками. Чем более выражены неровности рельефа, тем более выраженной становится погрешность, связанная с несоответствием реальной формы микрорельефа идеальной плоскости. В работах, посвященных измерениям объектов на поверхности дна [3, 4], ровность дна оценивается визуально, без применения каких-либо строгих критериев.

Целями исследования являются оценка влияния перепадов донного микрорельефа на погрешность измерений и определение критериев применимости метода измерений с использованием лазерной масштабной линейки.

Материалы и методы исследования

Для оценки погрешности измерений используется камера, находящаяся на высоте H над плоскостью дна, при этом плоскость изображения камеры параллельна плоскости дна. В таких условиях проекция любого отрезка на изображении будет параллель-

на исходному отрезку на дне. Это упрощает задачу, сводя ее к одномерному случаю, при котором анализируется сечение сцены, параллельное исследуемому отрезку (рис. 1).

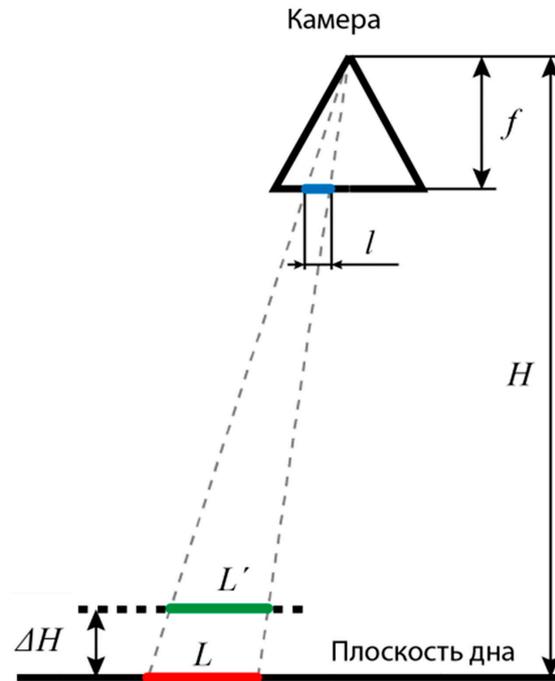


Рис. 1. Схема расположения камеры относительно дна для оценки погрешности измерений: f – фокусное расстояние камеры; H – расстояние от принципиальной точки до идеальной плоскости дна; ΔH – изменение высоты грунта в окрестности измеряемого объекта; L – отрезок, лежащий на плоскости дна; L' – отрезок, лежащий параллельно плоскости дна на расстоянии ΔH ; l – отрезок на плоскости изображения, являющийся одновременно проекцией отрезков L и L'

Предположим, что на плоскости дна задан отрезок длиной L и его проекция на изображении соответствует отрезку длиной l . Если этот отрезок с длиной L фактически расположен не на плоскости дна, а на некотором расстоянии ΔH выше или ниже ее, но при этом его проекция l остается неизменной, то его реальная длина будет равна L' . Для упрощения расчетов примем, что изменяется лишь расстояние от камеры до измеряемого отрезка, в то время как сами отрезки остаются параллельными плоскости изображения. Относительная погрешность δ в таком случае будет выражаться через отношение разности $(L - L')$ к L . Из подобия треугольников можно записать это как:

$$\delta = \Delta H / H.$$



Рис. 2. Фрагменты поверхности дна, использованные для построения 3D-моделей в целях проверки достоверности модели плоского дна. В верхнем углу каждого изображения указан номер станции, на которой получено изображение

На основе вышеописанных рассуждений было проведено исследование относительной погрешности измерений для различных участков поверхности дна. Исследование основывалось на видеоматериалах, полученных буксируемым подводным аппаратом «Видеомодуль», разработанным Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН [5]. Были использованы данные из нескольких экспедиций НИС «Академик Мстислав Келдыш». Видеозапись велась в ходе буксировки аппарата на расстоянии 1–2 м над грунтом со скоростью 0,5 узла. Для обработки данных использовалось программное обеспечение Agisoft Metashape, с помощью которого были построены плотные трехмерные облака точек для отдельных фрагментов поверхности дна. Эти фрагменты выбирались таким образом, чтобы были представлены разнообразные структуры и формы микрорельефа, но при этом визуально участок дна выглядел ровным. Изображения выбранных фрагментов поверхности дна представлены на рисунке 2.

Каждая 3D-модель масштабировалась в реальных размерах с учетом известного расстояния между лазерными указателями, составляющего 200 мм. После этого сохранялись отдельные файлы с облаком точек 3D-модели и облаком точек, отражающих положения камеры, использованных для реконструкции сцены. Восстановленная

3D-модель была довольно шумной, поэтому перед дальнейшей обработкой к облакам точек применяли сглаживание с использованием фильтра Гаусса. Для каждого облака точек была определена аппроксимирующая плоскость, на которой располагаются все точки, что сводится к решению системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} A_k x_{k1} + B_k y_{k1} + C_k z_{k1} + D_k \\ A_k x_{k2} + B_k y_{k2} + C_k z_{k2} + D_k \\ \dots \\ A_k x_{kN} + B_k y_{kN} + C_k z_{kN} + D_k \end{cases},$$

где $[x_{ki}, y_{ki}, z_{ki}]^T$ – i -я точка k -го облака точек, A_k, B_k, C_k, D_k – искомые коэффициенты аппроксимирующей плоскости для k -го облака точек. Поскольку в каждом облаке число точек $N \gg 3$, система уравнений является переопределенной, и ее можно решить методом наименьших квадратов. В результате были получены коэффициенты плоскости дна для каждой станции. Тогда, зная положения всех точек и камер, можно рассчитать расстояния от них до плоскости дна по формуле:

$$d_{ki} = \frac{A_k x_{ki} + B_k y_{ki} + C_k z_{ki} + D_k}{\sqrt{A_k^2 + B_k^2 + C_k^2}}.$$

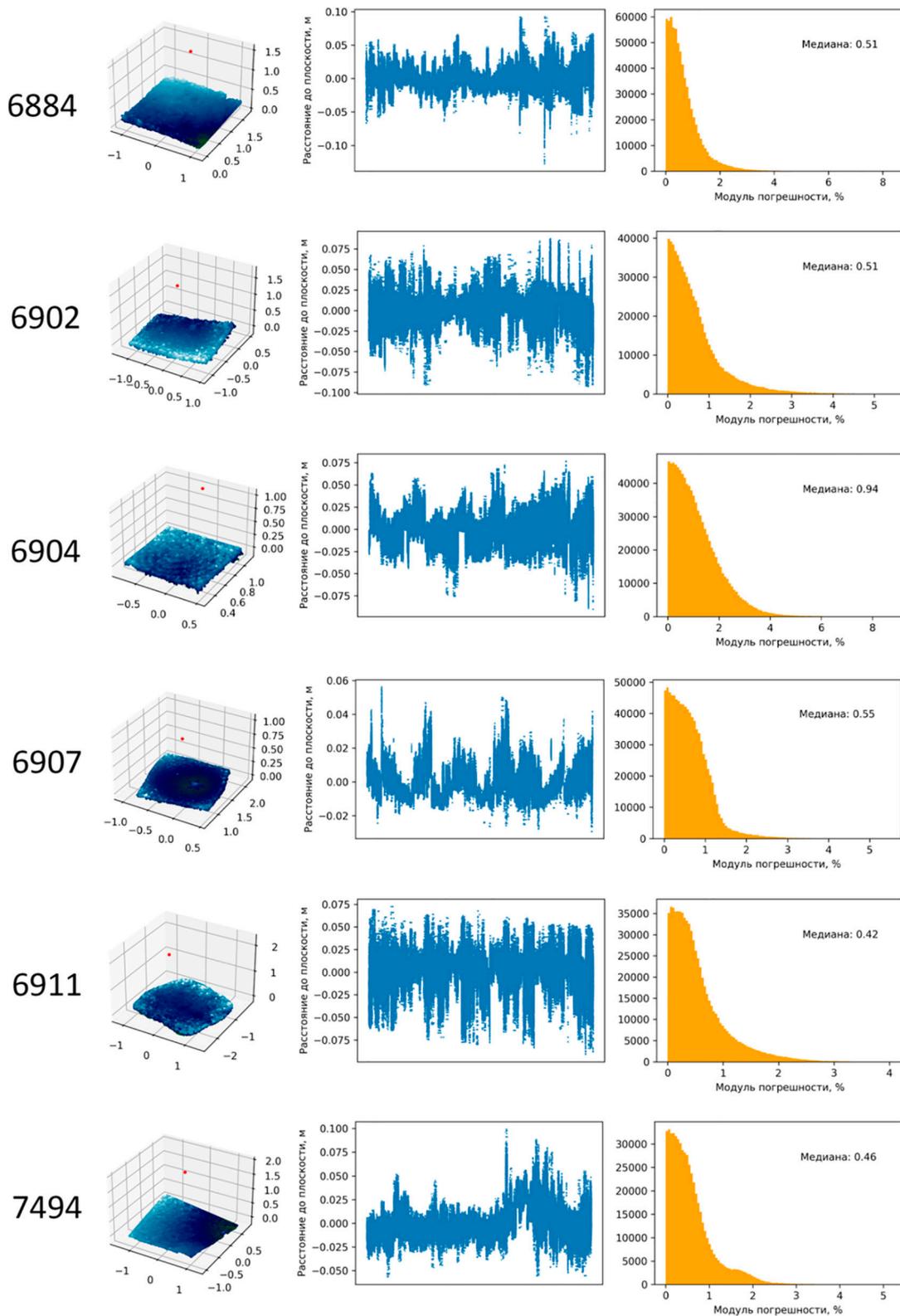


Рис. 3. Результаты исследования зависимости погрешности измерений от изменений микрорельефа поверхности дна и высоты камеры аппарата над грунтом для 6 станций: левый график – трехмерный вид облака точек фрагмента поверхности дна; средний график – удаление точек поверхности дна от аппроксимирующей плоскости; правый график – распределение модуля относительной погрешности. Для каждого распределения приведено медианное значение

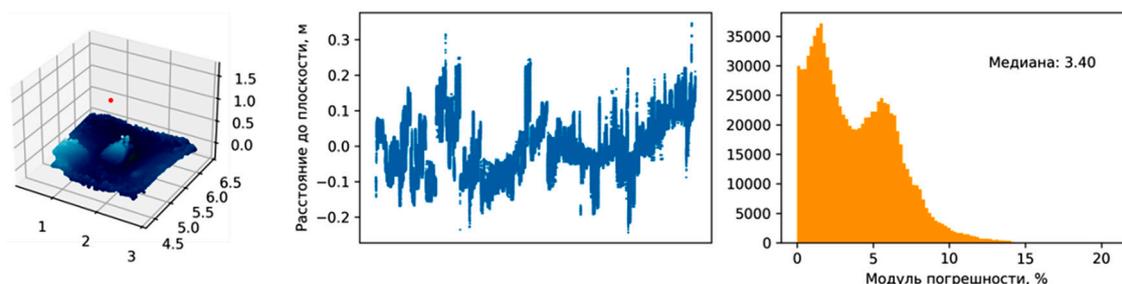


Рис. 4. Оценка разброса относительной погрешности измерений сцены с крупными объектами: слева – облако точек, в центре – удаление точек поверхности дна от аппроксимирующей плоскости, справа – распределение модуля относительной погрешности

По аналогичной формуле были рассчитаны расстояния D_k от камеры до плоскости дна. На этом этапе ориентация камер игнорируется, и все они считаются перпендикулярными плоскости дна. Считая каждое значение d_{ki} локальным отклонением поверхности дна от идеальной плоскости, получили выражение для относительной погрешности измерений в данной точке при данном расстоянии от камеры до плоскости:

$$\delta = d_{ki} / D_k.$$

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты проведенных исследований представлены на рисунке 3. Для каждой из сцен приведены графики значений показателя d_{ki} (средний столбец) и распределение модуля относительной погрешности измерений (правый столбец). Высота расположения аппарата над грунтом варьировалась в пределах от 1 до 2 м. Из графиков следует, что отклонения точек от усредненной плоскости составляют не более 100 мм, что соответствует 5–10% от высоты аппарата. Это свидетельствует о том, что с увеличением высоты над поверхностью грунта наблюдается снижение погрешности. Медианное значение модуля относительной погрешности для представленных фрагментов находится в пределах 0,5%, что является достаточно малым и подтверждает высокую точность проводимых измерений при условии, что поверхность дна принимается за идеальную плоскость. Большинство значений погрешности не превышают 2%.

Для проведения сравнительного анализа был изучен участок поверхности дна с крупным камнем. Высота камеры над грунтом в данном случае составляет 1,6 м. На рисунке 4 приведены графики отклонений точек от аппроксимирующей плоскости, а также распределение относительной погрешности измерений. Из графиков

видно, что в данном случае погрешность может достигать 10% и более, что является неприемлемо высокой величиной для точных измерений. Медианное значение относительной погрешности для этого участка составляет 3,4%, что почти в 7 раз превышает медианное значение модуля погрешности для ровных участков дна. Эти результаты свидетельствуют о значительном ухудшении точности измерений на участках с неоднородной поверхностью, где наличие крупных объектов, таких как камни, приводит к увеличению погрешности и снижению достоверности аппроксимации.

Заключение

Анализ измерений объектов при аппроксимации поверхности дна плоскостью показывает, что такой подход обеспечивает надежные результаты при условии, что рельеф дна относительно ровный, без резких перепадов, и в кадре отсутствуют объекты высотой более 100 мм. В таких условиях, когда камера установлена на высоте 1–2 м над грунтом, аппроксимация дна плоскостью позволяет получить достоверные измерения. Присутствие на дне более высоких объектов можно легко выявить при просмотре видеозаписей. Кадры, содержащие такие объекты или резкие изменения рельефа, могут быть либо исключены из дальнейшего анализа либо обработаны с помощью методов трехмерной реконструкции, что обеспечивает более точное моделирование сложных участков дна. Таким образом, использование плоскостной аппроксимации является оправданным и эффективным подходом в условиях стабильного рельефа, тогда как для участков с выраженными высотными изменениями необходимо применять методы, учитывающие трехмерные особенности поверхности.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю Н.А. Римскому-Корсакову, а также всему коллективу лаборатории гидролокации дна ИО РАН.

Список литературы

1. Purser A., Marcon Y., Dretter S., Hoge U., Sablotny B., Hehemann L., Lemburg J., Dorschel B., Biebow H., Boetius A. Ocean floor observation and bathymetry system (OFOBS): A new towed camera/sonar system for deep-sea habitat surveys // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2019. Vol. 44, No. 1. P. 87-99. DOI: 10.1109/JOE.2018.2794095.
2. Jones D., Bett B., Wynn R., Masson D. The use of towed camera platforms in deep-water science // *Underwater Technology*. 2009. Vol. 28, No 2. P. 41-50. DOI: 10.3723/ut.28.041.
3. Dunlop K.M., Kuhnz L.A., Ruhl H.A., Huffard C.L., Caress D.W., Henthorn R.G., Hobson B.W., McGill P., Smith Jr K.L. An evaluation of deep-sea benthic megafauna length measurements obtained with laser and stereo camera methods // *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2015. Vol. 96. P. 38-48. DOI: 10.1016/j.dsr.2014.11.003.
4. Istenič K., Gracias N., Arnaubec A., Escartín J., Garcia R. Automatic scale estimation of structure from motion based 3D models using laser scalers in underwater scenarios // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020. Vol. 159. P. 13-25. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.10.007.
5. Пронин А.А. Методика сбора и представления материалов видеосъемки поверхности дна с помощью необитаемого подводного буксируемого аппарата «Видеомодуль» // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2017. № 12-1. 2017. С. 142-147.

АСПЕКТЫ ГОРЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА ИЗ УГОЛЬНОГО ШЛАМА

Вилисов Н.Д., Фадеев П.И., Ушаков К.Ю., Богомолов А.Р.

ФГАОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»,
Кемерово, e-mail: barom@kuzstu.ru

Целью работы является рассмотрение возможности использования шлама, предоставленного предприятием ООО «ГОФ Анжерская», в качестве водоугольного топлива. В работе проведен технический анализ трех проб угольного шлама: определение зольности, влажности, выхода летучих и высшей теплоты сгорания. В работе был проведен рассев шлама с целью определения гранулометрического состава. Представлены результаты определения задержки зажигания и времени горения водоугольного топлива, состоящего из шлама, влажность которого была доведена до 45-50%. Высокая задержка зажигания косвенно свидетельствует о низкой реакционной способности (высокой энергии активации) водоугольного топлива из шламов, что коррелирует с низкими значениями выхода летучих у представленных образцов. При этом третья проба шлама имеет высокую зольность относительно первой и второй проб шлама, в связи с этим длительность горения третьей пробы шлама значительно превышала время горения других образцов при меньшем объеме испытываемого образца. Полученные результаты показали, что теоретическое использование угольного шлама ООО «ГОФ Анжерская» в качестве водоугольного топлива может быть проблематичным вследствие малого показателя выхода летучих и требует дополнительных испытаний на действующем котле.

Ключевые слова: угольный шлам, задержка зажигания, водоугольное топливо, переработка угольных отходов, обогатительная фабрика

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № 075-03-2024-082/2 от 15.02.2024 г. (FZES-2024-0001).

ASPECTS OF COAL-WATER FUEL COMBUSTION FROM COAL SLUDGE

Vilisov N.D., Fadeev P.I., Ushakov K.Y., Bogomolov A.R.

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, e-mail: barom@kuzstu.ru

The aim of the work is to consider the possibility of using the sludge provided by the Anzherskaya GOF LLC as a coal-water fuel. The paper presents a technical analysis of three samples of coal sludge: determination of ash content, humidity, volatile yield and higher calorific value. The sludge was sifted in order to determine the granulometric composition. The paper presents the results of determining the ignition delay and combustion time of coal-water fuel consisting of sludge, the humidity of which was brought to 45-50%. A high ignition delay indirectly indicates a low reactivity (high activation energy) of coal-water fuel from sludge, which correlates with low values of the volatile yield in the presented samples. At the same time, the third sludge sample has a high ash content, relative to the first and second sludge samples, due to which the combustion duration of the third sludge sample significantly exceeded the combustion time of other samples with a smaller volume of the tested sample. The obtained results showed that the theoretical use of coal sludge from Anzherskaya GOF LLC as a coal-water fuel may be problematic due to the low volatile yield and require additional testing on an operating boiler.

Keywords: coal sludge, ignition delay, coal-water fuel

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of project No. 075-03-2024-082/2 dated 15.02.2024 (FZES-2024-0001).

Введение

Основным сырьём для производства энергии в Кемеровской области – Кузбассе является уголь. Запасы угля в Кузбассе являются одними из самых больших в России, по различным оценкам, общие запасы угля в Кузнецком бассейне составляют от 600 до 700 миллиардов тонн [1], из которых значительная часть пригодна для разработки. Одной из стадий получения из угольного сырья товарного продукта, в том числе экспортного назначения, является обогащение на горно-обогатительных фабриках (далее – ГОФ). При реализации технологии

ГОФ имеются побочные продукты, которые относятся, с одной стороны, к отходам производства, а с другой – представляют потенциал в качестве топливных вторичных энергетических ресурсов. При этом только в одном Кузбассе накапливается около 30 млн тонн угольного шлама [2]. Проблема переработки шламов является важной задачей, так как переполненные шламохранилища или гидротвалы наносят большой вред окружающей среде. Выход шламов на обогатительных предприятиях составляет до 10% [3].

Существует несколько способов переработки угольного шлама [4]: химический, термический и физический способ.

Химическая переработка включает: производство ВУТ [5]; производство удобрений [6].

Метод термической переработки включает: сжигание и газификацию [7]; применение масляной агломерации [8].

Физический способ переработки включает в себя: складирование; использование в качестве стройматериала; обезвоживание и брикетирование [9] и нетермическую сушку мелкодисперсного угля [10].

Преобразование шлама в топливо (ВУТ или брикеты) является перспективным для ГОФ, так как на обогатительных фабриках имеется потребность в тепловой энергии, которая покрывается собственными котельными с котлами со слоевым сжиганием топлива. В данной работе рассматривается возможность сжигания шлама в виде водоугольного топлива (ВУТ). Угольные шламы содержат в себе как органическую, так и минеральную части. Основной проблемой угольных шламов является их высокая зольность (до 50%) и тонкодисперсность (менее 1 мм) [11], что ставит большой вопрос о целесообразности использования их без какой-либо подготовки в качестве топлива для предприятий энергетического комплекса. Обогащение угольных шламов или переработка их в композитное топливо позволит получить ценную топливную продукцию с минимальными затратами и теплотехническими характеристиками, пригодную для эффективного сжигания в энергоустановках.

Согласно изученным источникам [12], сжигание в вихревой адиабатической топке через форсунки суспензионного водоугольного топлива из различных марок углей с добавлением нефти и отработанных масел, метилового и этилового спиртов показало высокую эффективность. Водоугольное топливо из углей разной степени метаморфизма и тонкодисперсных угольных шламов ГОФ, даже с максимально низкими теплотехническими характеристиками, можно использовать в качестве топлива в энергетике [13-15].

Целью исследования является изучение возможности использования шлама ООО «ГОФ Анжерская» в качестве водоугольного топлива.

Материалы и методы исследования

В качестве сырья в работе использовались 3 образца шлама, предоставленные ООО «ГОФ Анжерская».

Результаты технического анализа, выполненного согласно методикам ГОСТ, представлены в таблице 1. Теплота сгорания была получена с использованием калориметра Лесо АС500.

Из таблицы 1 видно, что зольность у шламов 1 и 2 находится на уровне добываемых углей марки Д некоторых месторождений. В связи с этим калорийность данных шламов по высшей теплоте сгорания достаточно высокая, более 5000 ккал. Отметим, что выход летучих веществ у шлама 1 и 2 низкий и составляет 10-14%. Это свидетельствует о том, что процесс горения можно организовать при более высокой температуре в слое колосниковой решетки и в объеме топки. Также отметим, что шлам 3 имеет высокую зольность, более высокую влажность по сравнению со шламами 1 и 2 и низкий выход летучих веществ, на уровне 6%. По этой причине теплота сгорания составляет 2921 ккал. Также по методике ГОСТ был проведен рассев шлама с целью определения гранулометрического состава проб шлама. Результаты представлены на рисунке 1.

По результатам анализа гранулометрического состава всех проб шлама определено, что в образцах 1, 2 и 3 гранулята крупностью менее 160 мкм находится незначительное количество и составляет от 3,1 до 5,7 мас.%. Это свидетельствует о том, что шламы имеют средний по крупности размер зерен. Основное массовое содержание по размеру гранулята находится выше 200 мкм, т.е. более 90 мас.%. Отметим, что размер частиц более 1 мм составляет от 5 до 11 мас.%. Это свидетельствует о том, что горение шламов 1 и 2 в виде водоугольного топлива (ВУТ) может начинаться в объеме топки с размерами частиц менее 160 мкм, а более крупные частицы будут гореть в слое, в котором температура достигает не менее 1200 °С, предварительно прогреваясь при движении в топке от форсунки до горящего слоя на решетке.

Таблица 1

Технический анализ шлама

Образец	Зольность, %	Влажность, %	Выход летучих, %	Теплота сгорания, МДж/кг
Шлам 1	24,45	14,55	10,67	21,16
Шлам 2	22,78	10,92	13,73	23,79
Шлам 3	43,83	17,35	5,90	12,23

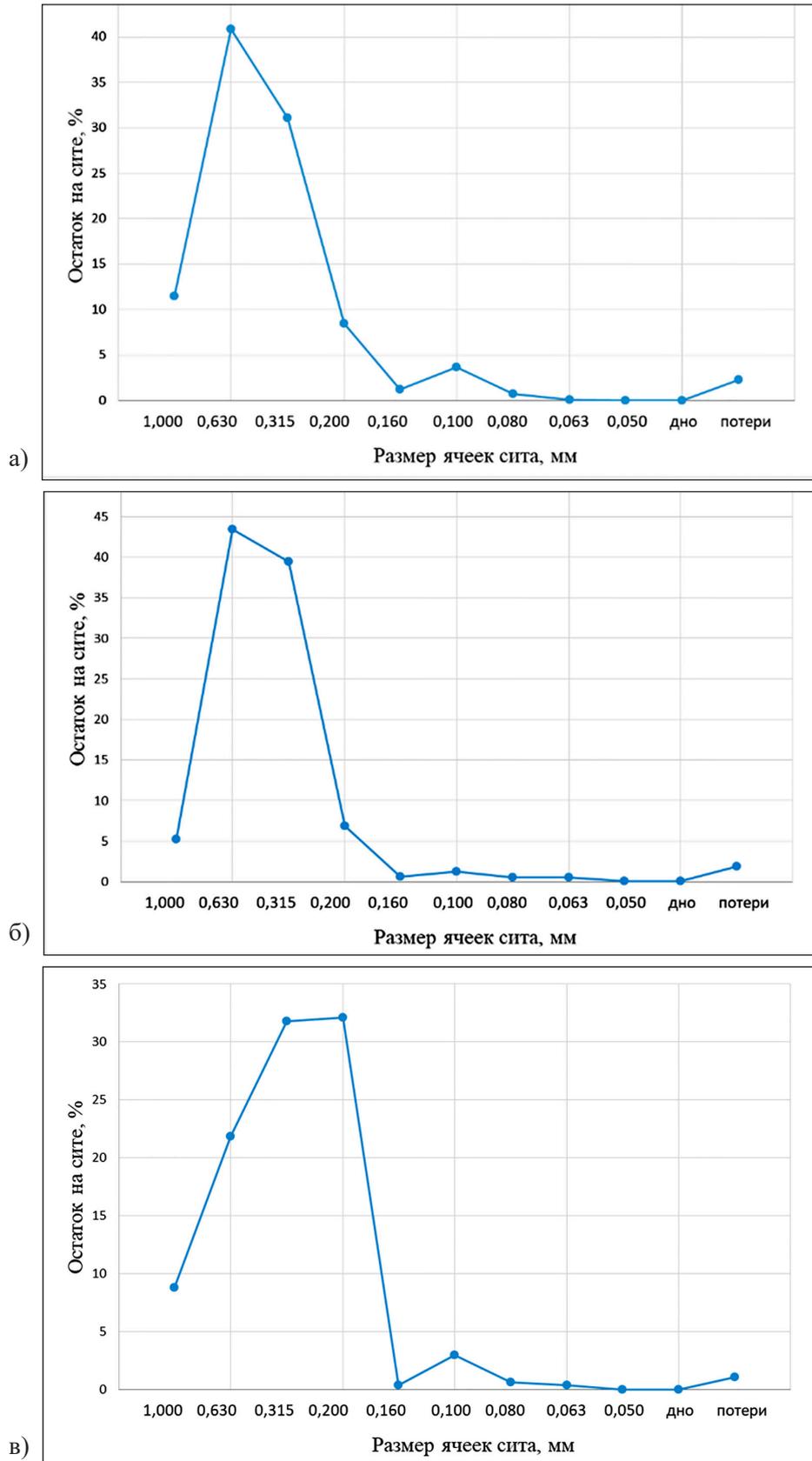


Рис. 1. Гранулометрический состав шлама: а – шлам 1; б – шлам 2; в – шлам 3

**Результаты исследования
и их обсуждение**

С целью определения пригодности шлама в качестве ВУТа для котла со слоевой топкой (на котельной ГОФ установлены 3 котла КВМ-1,6 (Гкал/ч) с шурующей планкой) и обоснования предполагаемых условий горения были проведены исследования задержки зажигания. Экспериментальные исследования времени задержки зажигания проводились при температуре 800 °С с использованием установки, состоящей из программируемой муфельной печи Plavka.Pro ПМ-2ПТР, высокоскоростной камеры Photron FASTCAM Mini UX и устройства для подачи образцов в камеру печи. Для исследований были подготовлены образцы ВУТ (смесь воды и шлама) с достижением консистенции ВУТ уровня текучего состояния.

С использованием высокоскоростной камеры Photron FASTCAM Mini UX были получены изображения капель во время за-

жигания и прекращения горения, которые представлены на рисунке 2.

Как по сохранению формы зольного остатка процесса горения формы капли ВУТ, так и по изображениям на рисунке 2 можно сделать вывод, что горение ВУТа из шлама относится к модели прочного зольного каркаса, описанного авторами в работе [16]. В данной работе были описаны модели горения твердого топлива. Согласно этой модели предполагается, что размер частицы остается постоянной величиной.

После получения из шлама ВУТ, путем добавления в него воды, экспериментальным путем была определена его плотность. Как видно из рисунка 2, размер капли до горения и после горения не изменился. Принимая, что размер капли постоянная величина и зная плотность ВУТ, определили массу капли ВУТ. Результаты определения времени задержки зажигания и длительность горения капель представлены в таблице 2.

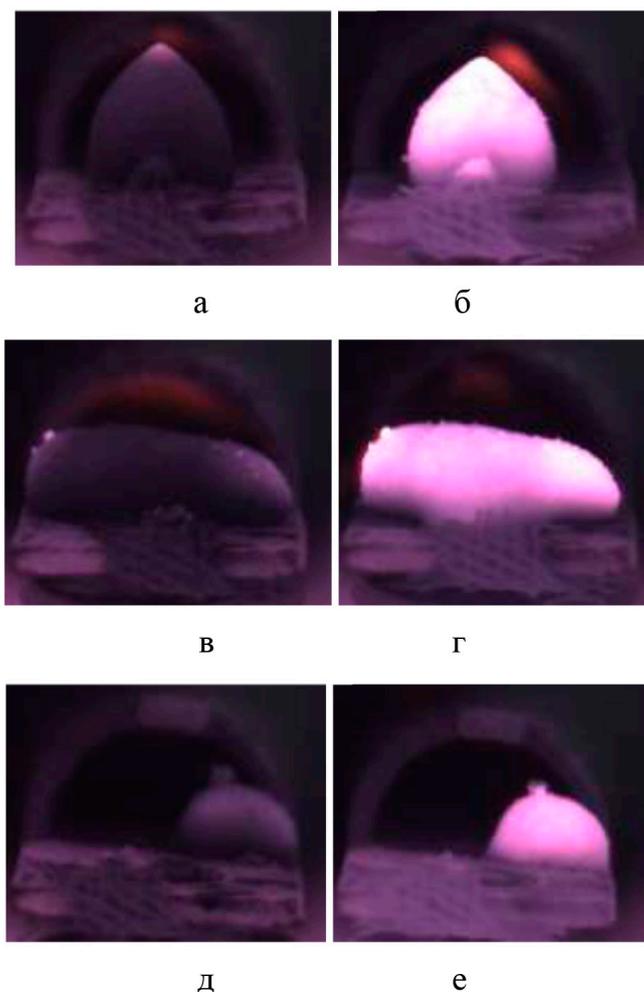


Рис. 2. Начало горения: а – ВУТ из шлама 1; в – ВУТ из шлама 2; д – ВУТ из шлама 3; конец горения: б – ВУТ из шлама 1; г – ВУТ из шлама 2; е – ВУТ из шлама 3

Задержка зажигания

Образец	$t_{\text{печи}} = 800^{\circ}$							
	Масса частицы, мг	Условный диаметр частицы, мм	Объем образца, нм^3	Плотность ВУТ, $\text{кг}/\text{м}^3$	Масса капли ВУТ, мг	Начало горения, с	Конец горения, с	Время горения 1 г, с
Шлам 1 ($W^p = 50\%$)	50,50	5,00	65,42	1543,87	101,00	20,788	38,496	175,33
Шлам 2 ($W^p = 45\%$)	45,00	4,66	55,96	1462,12	81,82	20,152	38,016	218,33
Шлам 3 ($W^p = 45\%$)	24,90	4,00	33,49	1352,64	45,30	22,260	69,884	1051,30

Задержка зажигания более 20 секунд косвенно свидетельствует о низкой реакционной способности (высокой энергии активации) ВУТ из шламов, что коррелирует с низкими значениями выхода летучих у представленных образцов. При этом шлам 3 имеет зольность 43%, а шламы 1 и 2 – 23-25%, в связи с этим длительность горения шлама 3 значительно превышала время горения других образцов при меньшем объеме испытываемого образца.

Заключение

В заключение можно отметить, что полученные результаты исследования показали:

– использование угольного шлама ООО «ГОФ Анжерская» в качестве водоугольного топлива может быть проблематичным вследствие малого показателя выхода летучих, и требуются дополнительные испытания на действующем котле;

– для ускорения процесса зажигания можно вводить присадку в ВУТ жидких органических компонентов, частично замещающих воду, например отработанного машинного масла, что создаст положительный эффект уменьшения задержки зажигания топлива.

Список литературы

1. Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Кемеровской области (на 15.06.2020 г.) [Электронный ресурс]. URL: <https://rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202011/b689bdea84fd-b2a34e12d4e178eb3886.pdf> (дата обращения: 22.10.2024).
2. Малышев Ю.Н., Зыков В.М. Угольная промышленность России в XXI веке // Уголь. 2000. № 11. С. 51-55.
3. Серёгин А.И. Горлов Е.Г. Разработка технологических схем переработки угольных шламов в товарную продукцию // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 8. С. 342-346.
4. Шинкевич В.А. Способы переработки угольных шламов // Материалы XVII Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС 2018» (Кемерово, 22-23 ноября 2018 г.). Кемерово: Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева, 2018. С. 303.1-303.5.

5. Олейникова М.И. Получение водоугольного топлива из шламов углеобогащения // Охрана окружающей среды и заповедное дело. 2020. № 1. С. 132-144.

6. Броварова О.В., Кузьмин Д.В. Физико-химические свойства и биологическая активность гуматов, выделенных из угольного шлама // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 6 (92). С. 14-19.

7. Козлов В.А., Гарбер В. Сжигание высокозольных шламов как путь к безотходной технологии обогащения углей // Уголь. 2017. № 8. С. 140-148.

8. Папин А.В., Игнатова А.Ю., Злобина Е.С. Применение метода масляной агломерации для переработки твёрдых углесодержащих отходов // Ползуновский вестник. 2016. № 2. С. 163-166.

9. Ефимов В.И., Корчагина Т.В., Антонов А.И. К вопросу переработки угольных шламов // Уголь. 2018. № 2. С. 77-81.

10. Кириллов К.М., Козлов В.А., Чернышева Е.Н. Инновационная сушка «Кронос». Глубокое нетермическое обезвоживание угля и минералов // Уголь. 2015. № 6. С. 56-60.

11. Фоменко Т.Г., Благов И.С., Коткин А.М., Бутовецкий В.С. Шламы, их улавливание и обезвоживание. М.: НЕДРА, 1968. 203 с.

12. Мурко В.И., Карпенко В.И., Баранова М.П., Бухмиров В.В., Темлянцева Е.Н. Особенности сжигания композиционных водоугольных топлив // Вестник государственного энергетического университета. 2024. № 3. С. 5-12.

13. Баранова М.П., Мурко В.И. Особенности сжигания водоугольного топлива из углей разной степени метаморфизма в малой энергетике // Материалы IV-й Международной научно-практической конференции, посвящённой Десятилетию науки и технологий в Российской Федерации, 300-летию Российской Академии наук, Году педагога и наставника в Российской Федерации и Году народной сплочённости в Республике Тыва (Кызыл, 19-20 октября 2023 г.). Кызыл: Издательство Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения Российской академии наук, 2023. С. 299-304.

14. Мурко В.И., Бухмиров В.В., Бушуев Э.Н., Джундубаев А.К., Султаналиев М.С., Темлянцева Е.Н. Технологическая оценка процессов сжигания водоугольного топлива из бурых углей месторождения Кара-Кече в Киргизской Республике // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2022. № 5. С. 12-17.

15. Мурко В.И., Папченков А.И., Голубин К.А., Шаншин А.Е. Обоснование технологических решений по переработке тонких угольных шламов на обогатительных фабриках АО «УК «КУЗБАССРАЗРЕЗУГОЛЬ» // Уголь. 2022. № 7 (1156). С. 27-33.

16. Шияев М.И., Афанасьев Ю.О., Богомолов А.Р. Модели горения частиц топлива // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2011. № 2. С. 75-80.

УДК 551.465

ОБЗОРНАЯ ТЕЛЕВИЗИОННАЯ КАМЕРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗООПЛАНКТОНА В ВОДОЕМАХ

Оленин А.Л.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва,
e-mail: olenin.al@ocean.ru*

Целью описанного в статье исследования явилась экспериментальная проверка эффективности использования камеры обзорного видеонаблюдения при быстром обследовании водоема на предмет поиска мезозoopланктона и общая визуальная оценка подводной растительности в прибрежной области и на дне. Автор спроектировал и изготовил макет обзорной погружаемой телевизионной камеры на основе созданной ранее камеры для подводно-технических работ. Камера состоит из рамы, бокса телевизионной камеры, светодиодного светильника, гибкого грузонесущего кабеля, внешнего аккумуляторного блока и ноутбука. Для обеспечения различных ракурсов съемки бокс камеры и светильник объединены в единый модуль, который может быть установлен внутри рамы как вертикально, так и горизонтально. Испытания камеры проведены в Киргизской Республике на высокогорных озерах Иссык-Куль, Чатыр-Кель, Сон-Кель, Тузкель. Особенность этих озер заключается в сравнительно холодном климате с повышенной высокогорной солнечной инсоляцией. Работы выполнялись с резиновой лодки. Съемки на Иссык-Куле проводились на северной стороне озера. Обнаружены скопления мезозoopланктона в вечернее время в придонной области среди подводной растительности. Также отмечено большое количество частиц минерального осадконакопления на растениях и поверхности дна. На озере Чатыр-Коль отмечены многочисленные пресноводные креветки. Применение обзорной телевизионной камеры оказалось очень эффективным при предварительных исследованиях высокогорных озер и показало необходимость их дальнейшего детального экспедиционного изучения. Сложные условия высокогорного климата позволяют эффективно отрабатывать и выявлять слабые места новой экспедиционной измерительной аппаратуры, которая может использоваться в дальнейшем, например в арктических условиях.

Ключевые слова: мезозoopланктон, телевизионная камера, бентос, Иссык-Куль, грузонесущий кабель, высокогорное озеро

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН тема №FMWE-2024-0024 («Методы и средства океанологических наблюдений для исследования природных и техногенных подводных объектов и экологии в гидросфере: разработка технологий многопараметрического сканирования подводных сред и объектов автономными и привязными зондами и профилографами»).

SURVEY TELEVISION CAMERA FOR RESEARCH OF ZOOPLANKTON IN RESERVOIRS

Olenin A.L.

*Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow,
e-mail: olenin.al@ocean.ru*

The purpose of the study described in the article was to experimentally verify the effectiveness of using a surveillance camera during a rapid survey of a reservoir for the search for mesozooplankton and a general visual assessment of underwater vegetation in the coastal area and on the bottom. The author designed and manufactured a mock-up of an overview submersible television camera based on a previously created camera for underwater technical work. The camera consists of a frame, a TV camera box, an LED lamp, a flexible load-carrying cable, an external battery pack and a laptop. To provide different shooting angles, the camera box and the lamp are combined into a single module that can be installed inside the frame both vertically and horizontally. The camera was tested in the Kyrgyz Republic on the high-altitude lakes Issyk-Kul, Chatyr-Kel, Son-Kel, Tuzkel. The peculiarity of these lakes is in a relatively cold climate with increased high-altitude solar insolation. The work was carried out from a rubber boat. Filming on Issyk-Kul was carried out on the northern side of the lake. Clusters of mesozooplankton were found in the evening in the bottom area among underwater vegetation. A large number of particles of mineral sedimentation on plants and the bottom surface were also noted. Numerous freshwater shrimps have been recorded on Chatyr-Kol Lake. The use of an overview television camera proved to be very effective in preliminary studies of high-altitude lakes and showed the need for further detailed expeditionary study. The difficult conditions of the high-altitude climate make it possible to effectively work out and identify weaknesses of the new expeditionary measuring equipment, which can be used in the future, for example, in Arctic conditions.

Keywords: mesozooplankton, television camera, benthos, Issyk-Kul, cargo-carrying cable, alpine lake

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, topic No. FMWE-2024-0024 (“Methods and means of oceanographic observations for the study of natural and man-made underwater objects and ecology in the hydrosphere: development of technologies for multiparameter scanning of underwater environments and objects with autonomous and tethered probes and profilers”).

Введение

На водоемах, морях и озёрах, где выполняются регулярные экспедиционные мониторинговые съемки, зоопланктонные исследования традиционно предваряются вертикальным зондированием STD-зондами, датчиками растворенного кислорода и флуориметрами [1-3]. На основе полученных профилей температуры, плотности, кислорода и флуоресценции делаются предположения о слоях возможного нахождения планктона и прицельный его пробоотбор. При выполнении поисковых работ по регистрации мезозоопланктона в ранее не обследованных труднодоступных горных водоемах большое время тратится на предварительный поиск областей его нахождения в водной толще. Автором было принято решение для экспресс-мониторинга мезозоопланктона в описанных выше труднодоступных водоемах использовать погружаемую обзорную телевизионную камеру. Такая камера, кроме того, даёт и традиционную общую информацию о подводной обстановке, растительности, икhtiофауне и бентосе. При этом камера позволяет выполнять бесконтактные исследования, когда не нарушается, в частности, слой донных осадков. Это не нарушает их структуру и не создает облаков мутности. Предполагалось использование камеры с борта небольшой лодки с передачей видеосигнала по гибкому грузонесущему кабелю с кевларовым силовым элементом. Видеоданные выводятся на экран ноутбука исследователя, находящегося на борту лодки.

Цель исследования – изучить возможности применения различного поискового оборудования для проведения экспедиционных работ на водоемах. Поставлена задача экспериментальной проверки эффективности использования камеры обзорного видеонаблюдения при быстром обследовании водоема на предмет обнаружения мезозоопланктона и общей визуальной оценки подводной растительности в прибрежной области и на дне, отработка методики использования камеры.

Материал и методы исследования

В настоящее время для поиска различных объектов под водой успешно используется подводная видеоаппаратура [4; 5]. Автором был спроектирован и изготовлен макет обзорной погружаемой телевизионной камеры. В данном случае необходимо обеспечить минимальные гидродинамические воздействия в поле зрения для исключения нарушения сложившейся стратификации или взмучивания донных осадков, поэтому

необходима свободно опускаемая на кабеле камера без каких-либо винтовых движителей. За основу была взята созданная ранее телевизионная камера для подводно-технических работ. Рабочая глубина погружения камеры до 60 метров. Состав камеры:

- рама;
- бокс телевизионной камеры;
- светодиодный светильник;
- гибкий грузонесущий кабель;
- внешний аккумуляторный блок;
- ноутбук.

Бокс телевизионной камеры собран на основе готового модуля в полиацеталевом прочном корпусе, 3D-модель показана на рисунке 1. Использовано проверенное решение с толстым плоским иллюминатором, уплотняемым торцевым резиновым кольцом круглого сечения.

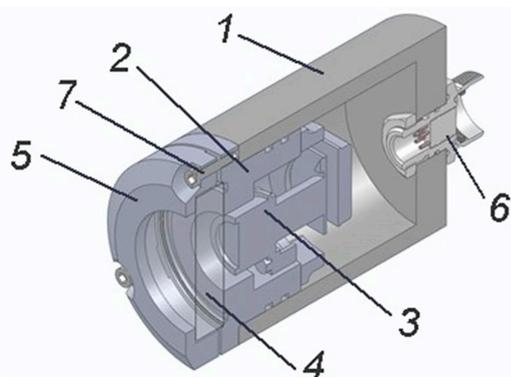


Рис. 1. Общий вид бокса телевизионной камеры: 1 – прочный корпус; 2 – фланец; 3 – модуль телевизионной камеры 5MP; 4 – иллюминатор; 5 – крышка; 6 – герморазъём; 7 – винт; жгуты электропроводов условно не показаны

В боксе использован готовый встраиваемый модуль камеры с цветной матрицей разрешением 5 мегапикселей. Видеопоток в формате H264 транслируется по интерфейсу Ethernet. Фокусировка задается через Ethernet с помощью программного обеспечения на рабочем месте оператора.

Передача видеоданных осуществляется через гибкий грузонесущий многожильный кабель-трос с кевларовым несущим центральным шнуром и полиуретановой оболочкой с продольной гелевой герметизацией. По спецификации длина физического канала передачи данных Fast Ethernet, реализованного в камере, не превышает 100 метров. Применён кабель длиной 40 м. Большого не требовалось по условиям обследуемых водоемов, а лишний кабель – это нежелательный для условий горной экспедиции вес.

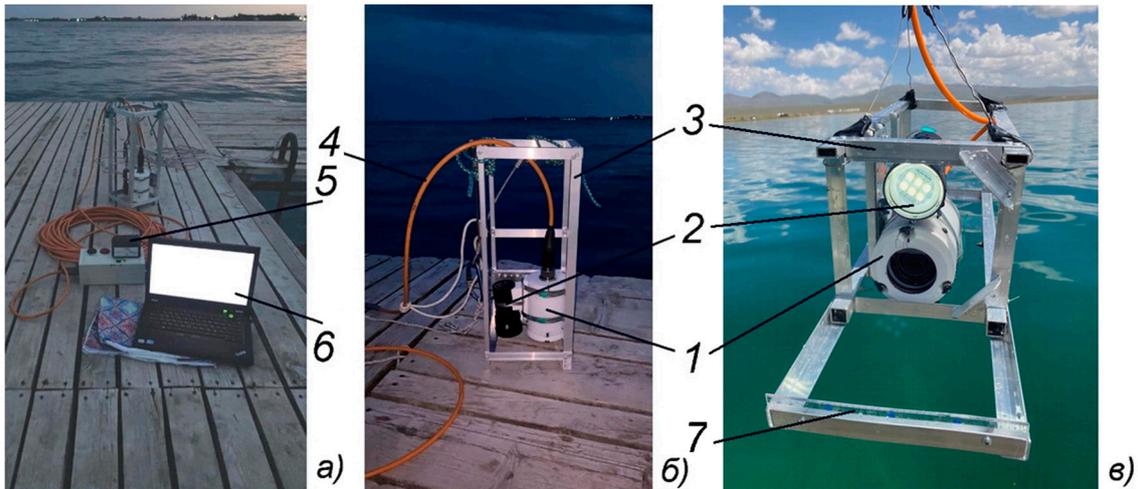


Рис. 2. Общий вид погружаемой обзорной телевизионной камеры: а) комплект для испытаний; б) вариант для обзора вниз; в) вариант для обзора вбок; 1 – бокс телевизионной камеры; 2 – светодиодный светильник; 3 – рама; 4 – гибкий грузонесущий кабель; 5 – внешний аккумуляторный блок; 6 – рабочее место оператора; 7 – измерительная линейка

Электропитание бокса телевизионной камеры осуществляется по отдельным жилам кабеля-троса от внешнего аккумуляторного блока. При этом применено повышение напряжения аккумулятора DC/DC-преобразователем в аккумуляторном блоке с 12 до 34 В, затем, после кабеля-троса, уже в боксе, применено понижение напряжения для питания модуля камеры до 12 В. Сделано это из-за ограниченной токовой нагрузки жил используемого кабеля, обусловленной малым сечением токоведущих жил кабеля-троса, и возможного во время работы модуля камеры кратковременного увеличения электропотребления.

Видеоданные проходят транзитом через внешний аккумуляторный блок и по патчкорду поступают на ноутбук оператора, где установлено программное обеспечение камеры. Оно позволяет вести онлайн-видеонаблюдение с регулировкой фокуса, а также запись видеофайлов и фотографий.

Система освещения реализована в макетном варианте в виде жестко закрепляемого на боксе камеры мощного подводного аккумуляторного светодиодного светильника с суммарной мощностью светодиодных элементов в 30 Вт. Управление светильником ручное с помощью расположенных на его корпусе герметичных кнопок. С их помощью светильник включается и ступенчато регулируется по мощности. Время непрерывной работы на максимальной мощности составляет около 40 минут.

Конструктивно бокс камеры и светильник объединены в единый модуль, который может быть установлен внутри рамы

как вертикально, так и горизонтально. Это необходимо для обеспечения различных ракурсов съемки.

Общий вид обзорной телевизионной камеры представлен на рисунке 2. На раму 3 установлены бокс телевизионной камеры 1 и светодиодный светильник 2. В поле зрения камеры на раме может быть установлена измерительная линейка 7, используемая для прямых контактных измерений донных объектов или подводной растительности. Сигналы от бокса телевизионной камеры 1 поступают по кабелю-тросу 4 через внешний аккумуляторный блок 5 на ноутбук оператора 6, на экран которого выводится изображение. Рама 3 позволяет как вертикальную, так и горизонтальную установку.

Результаты исследования и их обсуждение

Испытания камеры выполнены в Киргизской Республике на озере Иссык-Куль, и в дальнейшем камера использована для работ на труднодоступных высокогорных озёрах. Это озера Иссык-Куль, Чатыр-Кель, Сон-Кель, Тузкель. За исключением Иссык-Куля, озера остаются до сих пор малоизученными, тем более с применением современного оборудования. Их особенностью является расположение на высотах от 1600 до 3600 м над уровнем моря в областях со сравнительно холодным климатом, но при повышенной высокогорной инсоляции. Работы выполнялись с резиновой лодки, глубины съёмки от 1,5 до 25 метров. Съёмки на Иссык-Куле представлены на рисунке 3.



Рис. 3. Скопление мезозoopланктона в придонной области озера Иссык-Куль



Рис. 4. Частицы осадконакопления на дне озера Иссык-Куль

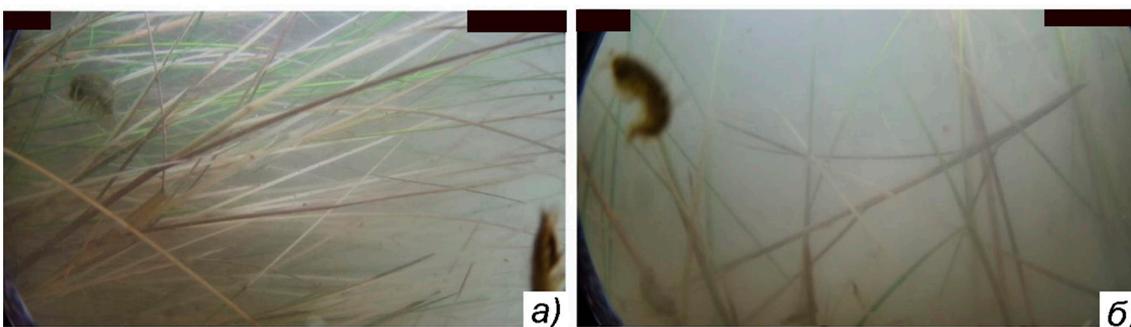


Рис. 5. Пресноводные креветки озера Чатыр-Коль

Телевизионная камера установлена в вертикальное положение для обзора вниз. Обнаружены скопления мезозoopланктона в вечернее время на глубинах до 4 м среди подводной растительности. Было выполнено несколько погружений в различных точках.

Съемки проводились на северной стороне озера в окрестностях г. Чолпон-Ата. Кроме того, было выполнено обзорное видеонаблюдение в прибрежной зоне до глубин 6 м (рис. 4). Отмечено большое количество частиц минерального осадконакопления на растениях и поверхности дна, что под-

сказывает необходимость проведения дополнительных исследований по регистрации взвеси.

На рис. 5 представлены примеры съёмки обзорной камерой на озере Чатыр-Коль, расположенном на высоте 3600 м. Из-за жестких временных ограничений была обследована небольшая часть озера с проведением съёмки до глубины всего около 1,5 метра. Ветровое волнение делало воду достаточно мутной, тем не менее удалось выполнить успешную предварительную съёмку, представленную на рисунке 5. Были отмечены многочисленные пресноводные креветки, необходимы их дальнейшие исследования.

Заключение

Применение обзорной телевизионной камеры оказалось очень эффективным при предварительных исследованиях высокогорных озёр, обнаружены различные виды мезозoopланктона, что диктует необходимость его дальнейшего детального экспедиционного изучения. Сложные условия высокогорного климата, а именно большие перепады температуры, разреженность воз-

духа, повышенная солнечная радиация, тяжелые условия транспортировки оборудования, позволяют весьма эффективно обрабатывать и выявлять слабые места новой измерительной аппаратуры, которая в дальнейшем может использоваться, например при проведении экспедиционных работ в арктических условиях.

Список литературы

1. Смирнов Г.В., Еремеев В.Н., Агеев М.Д., Коротаев Г.К., Ястребов В.С., Мотыжев С.В. Океанология. Средства и методы океанологических исследований. М.: Наука, 2005. 795 с.
2. Левашов Д.Е. Инструментальные методы оценки кормовой базы рыбных скоплений на основе оптических принципов измерений // Труды ВНИРО. 2014. Т. 152. С. 57-72.
3. Оленин А.Л., Бадюков И.Д., Коровчинский Н.М., Аистов Е.А. Видеосистема для мониторинга зоопланктона и частиц взвеси // Труды ВНИРО. 2021. Т. 184. С. 149-158. DOI: 10.36038/2307-3497-2021-184-149-158.
4. Розман Б.Я., Римский-Корсаков Н.А. Аппаратурные комплексы для дистанционных наблюдений в гидросфере // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 11-2. С. 276-280. DOI: 10.17513/mjrfi.12013.
5. Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А., Сенник Б.Н. Подводные дроны и телевизионные камеры для них // Контенант. 2023. Т. 22, № 2. С. 26-60.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ GNU OCTAVE И PYTHON

Тырышкин С.Ю.

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова»,
Барнаул, e-mail: service.vip-spe@yandex.ru

Статья посвящена изучению особенностей моделирования квантовых систем с использованием системы компьютерной алгебры GNU Octave и языка программирования Python, а также рассмотрению различных численных алгоритмов и инструментов для эффективного моделирования. Исследование основано на применении подходов и инструментов, таких как GNU Octave, позволяющий проводить численные вычисления и оперировать матричными структурами, и специальных пакетов, таких как Quantum Package for Octave (QPO) и MATLAB Quantum Computing Toolbox. Рассматривались также симуляторы квантовых вычислений QuEST и ProjectQ, написанные на Python и C++. Примеры схем подготовки квантово-запутанных состояний, таких как состояние Белла и состояние GHZ, иллюстрируют принципы моделирования. В результате исследования установлено, что GNU Octave обладает достаточной гибкостью и переносимостью для моделирования до 10 кубитов, а также поддерживает работу со смешанными состояниями (матрицами плотности). Применение специальных пакетов и библиотек позволило реализовать сложные квантовые операции, такие как подготовка чистых состояний и управление квантовыми воротами. Анализ симуляторов QuEST и ProjectQ показал различия в потреблении памяти и производительности, что важно учитывать при выборе инструмента для конкретных задач моделирования. Несмотря на высокую точность моделирования, существующие симуляторы имеют ограничения, связанные с большими объемами потребляемой памяти и сложностью масштабируемости. Проведенное исследование демонстрирует эффективность моделирования квантовых систем на классических компьютерах с использованием GNU Octave и Python для изучения квантовых алгоритмов и проверки гипотез в области квантовых технологий. Дальнейшее развитие методов и инструментов моделирования позволит улучшить производительность и снизить требования к ресурсам, что станет важным шагом на пути к созданию полноценных квантовых компьютеров.

Ключевые слова: моделирование, квантовые системы, квантовые вычисления, квантовая цепь

MODELING QUANTUM SYSTEMS USING GNU OCTAVE AND PYTHON

Tyryshkin S.Yu.

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, e-mail: service.vip-spe@yandex.ru

The article is devoted to the study of the features of modeling quantum systems using the GNU Octave computer algebra system and the Python programming language, as well as the consideration of various numerical algorithms and tools for effective modeling. The research is based on the application of approaches and tools such as GNU Octave, which allows performing numerical calculations and operating with matrix structures, and special packages such as the Quantum Package for Octave (QPO) and the MATLAB Quantum Computing Toolbox. Simulators for quantum computing, QuEST and ProjectQ, written in Python and C++, were also considered. Examples of schemes for preparing entangled quantum states, such as Bell state and GHZ state, illustrate the principles of modeling. As a result of the study, it was established that GNU Octave has sufficient flexibility and portability for simulating up to 10 qubits, and also supports working with mixed states (density matrices). The use of special packages and libraries made it possible to implement complex quantum operations, such as preparation of pure states and control of quantum gates. Analysis of QuEST and ProjectQ simulators showed differences in memory consumption and performance, which are important to consider when choosing a tool for specific modeling tasks. Despite the high accuracy of simulation, existing simulators have limitations associated with large amounts of consumed memory and scalability complexity. The research conducted demonstrates the effectiveness of modeling quantum systems on classical computers using GNU Octave and Python for studying quantum algorithms and testing hypotheses in the field of quantum technologies. Further development of modeling methods and tools will improve performance and reduce resource requirements, which will be an important step towards creating full-fledged quantum computers.

Keywords: modeling, quantum systems, quantum computing, quantum circuit

Введение

За последние несколько лет появилась и получила широкое распространение революционная парадигма вычислений, основу которой, в отличие от классических подходов, таких как модель фон Неймана, составляет квантовая механика, а не классическая физика [1]. Как известно, квантовые компьютеры дают возможность находить решения ряда задач, которые были до этого неразрешимы, например факторизация боль-

ших чисел, что является центральной проблемой безопасного шифрования данных. В то же время, несмотря на то, что развитие технологий, позволяющих создавать квантовые устройства, все еще находится в самом начале, сегодня уже можно констатировать определенный прогресс в проектировании и управлении квантовыми системами. К примеру, в начале 2024 г. компания IBM объявила [2] о том, что ей удалось создать рабочую квантовую схему, которая смогла

успешно разложить 15 на 3 и 5 благодаря применению технологии ядерно-магнитного резонанса.

В контексте вышеизложенного следует отметить, что моделирование квантовых компьютеров представляет собой очень важную задачу в квантовой информатике. Следует принять во внимание тот факт, что полномасштабный квантовый компьютер пока еще не воплощен в промышленных масштабах, поэтому моделирование квантовых компьютеров в настоящее время происходит на классических вычислительных машинах. В настоящее время моделирование квантовых систем – это едва ли не единственный метод, который позволяет протестировать имеющиеся квантовые алгоритмы и фиксировать квантовые эффекты, связанные с передачей и обработкой квантовой информации. Однако, хотя такой способ доступен, у него есть один существенный недостаток: для проведения моделирования на классическом оборудовании необходимы огромные вычислительные ресурсы, что в результате делает широкий спектр задач моделирования просто невыполнимым.

Ряд наметившихся последних тенденций, связанных с автоматизацией электронного проектирования, позволяет значительным образом расширить диапазон автоматизированного моделирования, а именно до:

(i) символического моделирования высокоуровневых программ на Verilog или даже C++;

(ii) решателей полевых уравнений.

В данном контексте, по мнению автора, особого внимания заслуживает альтернатива квантовых симуляторов с открытым исходным кодом, которая может быть реализована с использованием инструментов GNU Octave и Python. Таким образом, исследования в данном направлении представляются актуальными, теоретически и практически значимыми, что и предопределило выбор темы данной статьи.

В то же время, несмотря на то, что сегодня существует ряд обзоров, в которых рассматриваются теоретические и/или экспериментальные аспекты квантовых вычислений, вопрос обсуждения методов моделирования идеальных и физических моделей квантовых компьютеров остается открытым. Также отдельного внимания заслуживают задачи сравнения различных симуляторов с точки зрения их производительности. В дальнейшем развитии нуждаются методы улучшения асимптотического времени и сложности памяти квантового моделирования в случаях, когда задействованные квантовые операторы демонстрируют значительную структуру.

Таким образом, **цель исследования** заключается в рассмотрении особенностей моделирования квантовых систем с помощью GNU Octave и Python.

Материалы и методы исследования

Основными методами исследования в этой работе являются: методы интеллектуального анализа; методы объектно-ориентированного и функционального анализа; методы численного моделирования; сравнительный анализ.

Результаты исследования и их обсуждение

GNU Octave представляет собой систему компьютерной алгебры (CAS), которая используется для проведения численных, а не символьных вычислений. Главная структура данных в Octave – это матрица, но система также позволяет оперировать C-подобными структурами. Синтаксис языка Octave имеет много схожих черт с языком MatLab. GNU Octave позволяет наблюдать унитарную эволюцию квантовых систем [3]. Этот пакет для моделирования был выбран как инструмент реализации простых вычислений на чистых и смешанных квантовых состояниях, а GNU Octave определена в качестве целевой CAS из-за ее гибкости и переносимости.

С помощью GNU Octave можно моделировать до 10 кубитов. Достоинством GNU Octave является то, что данная система позволяет включить формализм смешанных состояний (матриц плотности), что дает возможность пользователю оперировать на разных уровнях абстракции. Функции нижнего уровня обеспечивают процессы сбора сложных квантовых ворот, в том числе ворот с произвольными управляемыми и целевыми кубитами, также они позволяют готовить чистые состояния и произвольные смеси чистых состояний.

Примерами команд нижнего уровня являются:

– Ket – производит чистое квантовое состояние,

– State – выдает матрицу плотности для данного чистого состояния,

– MixStates – готовит смесь матриц плотности,

– ProductGate – дает возможность построить множество квантовых ворот,

– ControlledGate – позволяет построить управляемые ворота с множеством управляющих и целевых кубитов,

– CNot = ControlledGate.

Последнее равенство указывает на то, что CNot – это сокращение от ControlledGate. Функция принимает в качестве аргументов

ControlledGate. Первый аргумент определяет размер выходного гейта, а второй – элементарный гейт, которым нужно управлять. В качестве второго аргумента функции ControlledGate можно использовать любые однокубитовые ворота. Третий и четвертый аргументы этой функции представляют управляемый и целевой кубиты соответственно, при этом функция не будет работать правильно, если они перекрываются [4].

Для моделирования квантовых вычислений в GNU Octave можно использовать различные специализированные пакеты и библиотеки. Ниже приведен список библиотек для GNU Octave, применяемых для моделирования квантовых вычислений, с краткими описаниями.

1. Quantum Package for Octave (QPO). Это специализированный пакет для моделирования и симуляции квантовых систем в Octave. Он содержит множество функций для создания квантовых состояний, операторов, проведения измерений и анализа результатов.

2. QuTiP (Quantum Toolbox in Python). Хотя QuTiP изначально разрабатывался для Python, он также может использоваться в Octave благодаря совместимости синтаксиса и возможности вызова Python-скриптов из Octave.

3. MATLAB Quantum Computing Toolbox. Несмотря на то, что этот инструмент

предназначен для MATLAB, многие его функции могут быть перенесены в Octave с минимальными изменениями.

Рассмотрим конкретные примеры практической реализации моделирования квантовых систем с помощью GNU Octave.

Схема подготовки состояния Белла

Схема подготовки состояния Белла (EPR) применяется для целей генерации двух максимально запутанных квантовых состояний (EPR-пары). Цель использования данной схемы заключается в проверке неравенств Белла в квантовой механике [5, 6]. Она состоит из ворот CNOT и ворот Хадмарда. Математическое представление этих ворот имеет следующий вид:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$CNOT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

На рис. 1 показана схема подготовки состояния Белла.

Алгоритм 1 Алгоритм генерации пар EPR

- 1: **начало**
 - 2: ввод $|a\rangle$
 - 3: ввод $|b\rangle$
 - 4: применить H к
 - 5: вычислить тензорное произведение $|a\rangle$ и $|b\rangle$
 - 6: применить CNOT к произведению
 - 7: **конец**
-

Рис. 1. Алгоритм генерации EPR

Алгоритм 2 Алгоритм подготовки спутанности 3 кубитов

- 1: **старт**
 - 2: ввод $|a\rangle$
 - 3: ввод $|b\rangle$
 - 4: ввод $|c\rangle$
 - 5: применить H к $|a\rangle$
 - 6: вычислить тензорное произведение $|a\rangle$ и $|b\rangle$
 - 7: применить CNOT к произведению
 - 8: вычислить тензорное произведение результата и $|c\rangle$
 - 9: применить CNOT к $|b\rangle$ и $|c\rangle$
 - 10: **конец**
-

Рис. 2. Алгоритм подготовки спутанности 3 кубитов

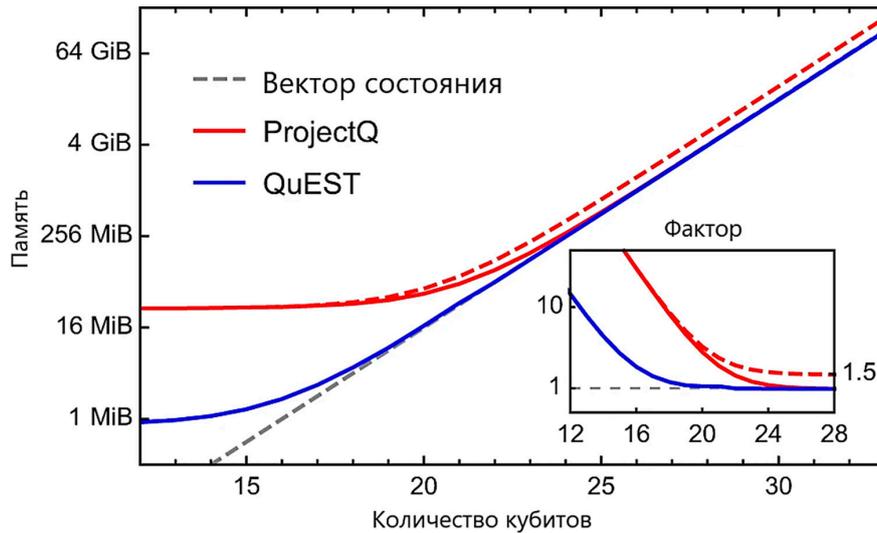


Рис. 3. Потребление памяти процессами QuEST и ProjectQ на Python, о котором сообщает Linux's/proc/self/status во время моделирования случайных цепей на одном вычислительном узле ARCUS с памятью 256 ГБ

Схема подготовки состояний GHZ

Схема GHZ (названная в честь ее создателей Гринбергера, Хорна и Цайлингера) используется для генерации трех или более максимально запутанных квантовых состояний. В ней также применяются ворота Хадамарда и CNOT [7–9]. На рис. 2 показана схема, которая используется для генерации трех максимально запутанных кубитов и подготовки трехквантового состояния GHZ.

Также отдельного внимания заслуживают симуляторы квантовых вычислений, которые могут найти свое эффективное применение для оптимизации производительности. Например, QuEST и ProjectQ – они представляют собой квантовую вычислительную среду с открытым исходным кодом, включающие компилятор, ориентированный на квантовое оборудование, и квантовый компьютерный симулятор C++ с интерфейсом Python. Оба симулятора хранят чистое состояние в $2n$ комплексных числах с плавающей запятой для системы из n кубитов, с двойной точностью в каждой мнимой и вещественной компоненте. В случае необходимости QuEST может быть настроен на применение четверной или одинарной точности. QuEST и ProjectQ хранят состояние в примитивах C/C++, и поэтому (по умолчанию) потребляют $16 \times 2n$ B32 только в векторе состояния. Однако для ProjectQ могут быть характерны накладные расходы памяти $\times 1,5$ когда осуществляется распределение состояния [10]. Традиционные затраты памяти, характерные для обоих симуляторов в рамках одного

потока представлены на рис. 3, как видно, они незначительно отличаются от затрат в многопоточном режиме.

В то время как QuEST позволяет напрямую читать и записывать вектор состояния, в ProjectQ выборка одной амплитуды имеет накладные расходы на Python, а запись поддерживается только в пакетном режиме, что требует больших затрат памяти, поскольку объекты Python занимают больше памяти, чем сопоставимый примитив C – до $3 \times 33,34$. Таким образом, итерация вектора состояния в ProjectQ либо очень медленная, либо требует значительных затрат памяти, что может ограничить ее полезность в некоторых приложениях моделирования.

Стоит отметить, что наряду с рассмотренными программными пакетами и языками программирования существует большое множество других инструментов моделирования квантовых вычислительных процессов. Многие современные компании занимаются перспективными разработками в данном направлении.

Заключение

Квантовые вычисления – это новая парадигма вычислений, использующая принципы квантовой механики. Ее теоретическая основа допускает вычислительную мощность, экспоненциально превышающую классические компьютеры. Однако, учитывая зарождающуюся стадию данной парадигмы и технические трудности в поддержании квантовых битов (кубитов), практические квантовые компьютеры все еще находятся в экспериментальной разработке.

В данном контексте особое значение приобретает моделирование квантовых систем.

В статье рассмотрены особенности моделирования квантовых схем с использованием GNU Octave и Python. Эти инструменты для квантового точного моделирования позволяют проводить эффективные симуляции квантовых систем, а также реализовывать вычисления со смешанными состояниями.

Список литературы

1. Пантелеев П.А. Тензорные сети для эффективной симуляции квантовых вычислений // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. 2023. Т. 27, № 1. С. 152.
2. Eun Oh, Xuanying Lai Distributed Quantum Computing with Photons and Atomic Memories // Advanced Quantum Technologies. 2023. Vol. 6, Is. 6. P. 87–94.
3. Якубова Н.С., Абдурасулова Г.Э. Исследование нечетких регуляторов в системах интеллектуального управления на основе квантовых вычислений // Universum: технические науки. 2023. № 3–1 (108). С. 22–25.
4. Huynh T.T. Tran, Hieu T. Nguyen, Long Thanh Vu, Samuel T. Ojetola. Solving differential-algebraic equations in power system dynamic analysis with quantum computing // Energy Conversion and Economics. 2024. Vol. 5, Is. 1. P. 120–127.
5. Нильсен М.А., Чанг И.Л. Квантовая информация и квантовые вычисления. М.: Мир, 2006. 824 с.
6. Ефимов А.И. Основы квантовых вычислений. М.: Физматлит, 2020. 320 с.
7. Гринбергер Д., Хорн М., Цайлингер А. Bell's Theorem without Inequalities // Physical Review Letters. 1990. Vol. 65, Is. 13. P. 33–40.
8. Гринштейн Дж. Квантовые вычисления для программистов / Пер. с англ. А.А. Слинкина. СПб.: Питер, 2019. 352 с.
9. Нильсен М., Чанг И. Квантовая информация и квантовые вычисления / Пер. с англ. Е.Н. Петровой. Долгопрудный: Интеллект, 2006. 824 с.
10. Vaishali Sood, Rishi Pal Chauhan. Progress and prospects of quantum computing in sustainable development: An analytical review // Expert Systems. 2023. Vol. 41, Is. 7. P. 26–34.

УДК 551.46.062.5

РАЗРАБОТКА НОВОЙ МОДЕЛИ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ГНОМ С МОДУЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ

Шерстов Е.А., Розман Б.Я., Елкин А.В.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва,
e-mail: sherstov@gnomrov.ru, borisdruk@mail.ru, elkin@gnomrov.ru*

Целью проекта является создание конфигурируемого аппарата, позволяющего пользователю самому конфигурировать аппараты за счет добавления ряда типовых узлов. Предусмотрена возможность установки разнофункциональных устройств, имеющих совместимые конструктивы и интерфейсы, а также одинаковые номиналы и мощности питания. Как пример можно привести установку второй камеры, датчиков параметров воды (температуры, электропроводности и др.), датчика радиационного фона. Также могут быть установлены гидроакустические приборы и навигация. При этом в некоторых случаях применения возникает необходимость усилить тягу аппарата. Например, типичная ситуация – осмотр состояния садков в фермах рыбо-разведения при сильном течении: аппарат не справляется с течением, тяга недостаточна, требуется добавить мощность. Сейчас в этой ситуации приходится покупать более мощный аппарат, что существенно дороже, чем просто либо поставить более мощные движители, что ведет к перedelке конструкции, либо увеличивать число имеющихся движителей, поставить еще одну или несколько таких пар. В данном случае этот способ позволит увеличить тягу за счет установки дополнительных движителей – добавления одной или двух пар, устанавливаются дополнительные движители (в базовом варианте их четыре), можно поставить две пары дополнительно. В данной статье приведены результаты исследования электронных компонентов, датчиков, современных материалов и сплавов, а также их физико-химических и физических параметров. Наиболее подходящим оказался сплав АД-35 с точки зрения удельного веса и прочности. Данное исследование и его результаты позволяют спроектировать конфигурируемый подводный аппарат типа ГНОМ.

Ключевые слова: телеуправляемый обитаемый подводный аппарат, подводные исследования, подводный робот, подводное видео

Статья написана в рамках государственного задания ИО РАН № FMWE-2024-0026.

MODEL OF A REMOTE-CONTROLLED UNINHABITED UNDERWATER VEHICLE GNOME WITH A MODULAR STRUCTURE

Sherstov E.A., Rozman B.Ya., Elkin A.V.

*Shirshov Institute of Oceanology. Russian Academy of Sciences, Moscow,
e-mail: sherstov@gnomrov.ru, borisdruk@mail.ru, elkin@gnomrov.ru*

The aim of the project is to create a configurable device that allows the user to configure the devices himself by adding a number of standard nodes. This means the possibility of installing multifunctional devices with compatible designs and interfaces, as well as the same ratings and power supply, as an example, the installation of a second camera, sensors for water parameters (temperature, electrical conductivity, etc.), a radiation background sensor. Also sonar instruments and navigation. At the same time, in a number of applications, it becomes necessary to increase the thrust of the device. For example, a typical situation is an inspection of the condition of cages in fish farms - a strong current, the device cannot cope with the current, insufficient traction, it is necessary to add power. Now in this situation, you have to buy a more powerful device, which is significantly more expensive than just putting either more powerful propellers, which leads to a redesign of the design, or increasing the number of available propellers, putting one or more such pairs. In this case, this path will increase the thrust by installing additional propellers - adding one or two pairs, additional propellers are installed (in the basic version there are four of them), you can put two pairs additionally. This article presents the results of a study of electronic components, sensors, modern materials and alloys, as well as their physico-chemical and physical parameters. The AD-35 alloy turned out to be the most suitable in terms of specific gravity and strength. This study and its results make it possible to design a configurable underwater vehicle of the GNOME type.

Keywords: remote-controlled uninhabited underwater vehicle, underwater robot, underwater research, underwater video

The article was written within the framework of the state assignment of the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences No. FMWE-2024-0026.

Введение

В настоящее время быстро растет рынок телеуправляемых аппаратов-роботов для контроля состояния разнообразных подводных объектов техногенного происхождения, число которых стремительно увеличивается.

Нефтяная и газовая промышленности используют обитаемые подводные аппараты для создания подробных карт морского дна перед началом постройки подводной инфраструктуры. В результате трубопроводы могут быть протянуты наиболее экономичным и одновременно экологичным способом.



Рис. 1. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты «ГНОМ Микро» и «СуперГНОМ»

Необитаемые подводные аппараты позволяют геодезическим компаниям проводить более точные исследования тех областей, где традиционные батиметрические исследования были бы менее эффективными или слишком дорогими [1]. Еще одна насущная задача – замена аппаратами-роботами сложного и опасного водолазного труда, особенно на глубинах больше 50 м и в труднодоступных местах. В военной области важные задачи – поиск и уничтожение мин и ряд других применений, таких как разведка акваторий, обследование и картирование дна, противодиверсионная и антитеррористическая защита.

Столь широкая сфера применений телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) обуславливает необходимость использования различных моделей ТНПА, характеристики которых максимально соответствуют поставленным задачам.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН) более 20 лет занимается разработкой и производством телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) класса Микро «ГНОМ». Линейка продукции этого класса представлена следующими моделями: «ГНОМ Микро», «ГНОМ Стандарт», «СуперГНОМ» (рис. 1). Модели различаются рабочей глубиной, мощностью, комплектацией, что определяет их функциональность и сферу применения.

Пользователь ТНПА может выбрать нужную модель исходя из своих потребностей.

Однако производство разных моделей подразумевает необходимость использования разных комплектующих для каждой из них, что увеличивает затраты на производство. Потребности пользователя не ограничены одной задачей, часто возникает необходимость дооснащения аппарата, что не всегда возможно для кон-

кретной модели. Кроме того, для производства ТНПА использовался ряд зарубежных комплектующих (DC-DC преобразователи, электромоторы), поставки которых в Россию сейчас ограничены. Поэтому возникла необходимость разработки новой модели, которая даст возможность пользователю самостоятельно конфигурировать ТНПА и заменить все вышеуказанные модели.

До появления такой опции пользователю было необходимо использовать несколько аппаратов, часто разных производителей. Все аппараты требуют технического обслуживания и ремонта, что создавало дополнительные трудности при эксплуатации.

Цель проекта – сделать конфигурируемый аппарат, что означает предоставить пользователю возможность самостоятельно определять состав подводного модуля, в том числе системы управления, путем установки необходимого количества движителей, видеокамер и другого оборудования, тем самым добившись нужной функциональности и характеристик ТНПА.

Метод и материалы исследования

Такой моделью стала новая разработка ИОРАН – ТНПА ГНОМ, состоящего из отдельных унифицированных модулей. За счет этого могут быть снижены затраты на производство. Для ремонта не требуются высококвалифицированные специалисты – достаточно просто заменить поврежденный узел. При этом повысились надежность и ремонтпригодность ТНПА.

Произведена замена материала прочного корпуса подводного модуля с АМГ-6 на АД-35 с целью улучшения прочностных и массогабаритных характеристик.

Продукт разработан с учетом использования современных комплектующих, доступных на российском рынке. На аппарате установлены одна или две видеокаме-

ры с разрешением FullHD/4K. Подводный модуль может быть оснащен двигателями в количестве от четырех до восьми. При этом сохранены преимущества существующей линейки продукции: малые габариты, низкое энергопотребление, относительно тонкий кабель.

Для реализации данного проекта сотрудниками лаборатории в 2024 году выполнены следующие работы:

- разработаны и изготовлены прочные корпуса подводного модуля, обеспечивающие модульность конструкции;
- разработана система питания и управления ТНПА для реализации возможности установки необходимого количества двигателей (4, 6 или 8), одной или двух видеокамер разрешением не менее FullHD и дополнительного оборудования (манипулятора, лазерных указателей, гидролокатора кругового обзора, приемо-передатчиков гидроакустической навигационной системы и пр.).

Разработанная система управления позволяет удерживать аппарат в любых пространственных положениях, а также осуществлять перемещение аппарата как в земной, так и в связанной с аппаратом системе координат.

Структурно система управления состоит из блоков, отвечающих за следующие функции:

- сбор величин управляющих воздействий от пульта управления;
- сбор информации с интегрального блока датчиков;
- расчет пространственного положения и текущих скоростей ТНПА;
- анализ внешних воздействующих факторов;
- расчет управляющих воздействий (для каждого канала);
- консолидация управляющих воздействий и формирование заданий для двигателей.

Система управления структурно разделена на шесть отдельных каналов расчета управляющего воздействия: три канала управления угловым положением аппарата и три канала управления линейным перемещением аппарата.

- Разработана линия передачи данных для возможности передачи видеосигнала с 2 видеокамер разрешением не хуже FullHD.

В основе разработки лежит система телекоммуникации и ретрансляции видео под одной витой паре более ранних разработок сотрудников лаборатории [2].

- Разработаны программные модули, обеспечивающие функциональность ТНПА в различных конфигурациях, а именно:

- 2 вертикальных, 2 горизонтальных двигателя, 1 видеокамера;
- 2 вертикальных, 4 маршевых двигателя, 1 или 2 видеокамеры;
- 8 двигателей, расположенных векторно, 2 видеокамеры;
- вышеперечисленные варианты с набором дополнительного оборудования: манипулятор, лазерные указатели, навигационный комплекс: приемник – система повышения точности сигналов (DGPS); трехосевой индукционный компас, датчик ориентации с углом охвата 360°, датчики ускорений; инерционная навигационная система с доплеровским лагом [3]; гидроакустическая навигационная система, гидролокатор кругового обзора.

Аппаратная часть подводного модуля ТНПА реализована на базе микроконтроллера на ядре Cortex M4F. Надводный блок управления/питания создан на базе персонального компьютера с процессором Intel Core i5 не ниже 7-го поколения.

Программное обеспечение подводного модуля написано на языке программирования C и совместимо с контроллерами на базе ядра Cortex M4F. Программное обеспечение береговой станции написано на языке программирования C++ и совместимо с операционными системами семейства Linux Ubuntu.

- Выполнены математическое моделирование и расчет гидродинамики ТНПА, в частности выполнен расчет на прочность всех дорабатываемых узлов при воздействии гидростатического давления, равного 1,5 МПа.

Проведен расчет плавучего объема, нейтральная плавучесть погружного модуля достигается без использования поплавков. По результатам компьютерного моделирования гидродинамики ТНПА получены уравнения сил и моментов сопротивления, которые использованы для создания математической модели ТНПА и синтеза системы управления.

Получены массогабаритные параметры дорабатываемого продукта:

- масса подводного модуля в зависимости от конфигурации будет составлять от 5 до 10 кг;
- габаритные размеры располагаются в пределах 420–470 мм x 380–400 мм x 270–300 мм.

Для расчета максимальной скорости ТНПА в трех направлениях (марш, лаг, глубина) были использованы данные компьютерного моделирования гидродинамики ТНПА. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Расчетная максимальная скорость ТНПА

Vx max (марш)	1,9 м/с
Vy max (глубина)	0,9 м/с
Vz max (лаг)	1 м/с

• Проведена разработка дизайна и конструкции ТНПА с модульной структурой:

- определена структура движительно-рулевого комплекса в трех вариантах;
- составлена математическая модель динамики привязной подводной системы [4];
- разработана компоновка ТНПА для обеспечения необходимого количества степеней свободы для каждого из вариантов;
- реализована возможность подключения дополнительного оборудования конечным пользователем.

В результате комплекса проведенных работ реализованы следующие новые функции и/или характеристики ТНПА:

- реализована возможность конфигурирования подводного модуля путем установки необходимого количества двигателей, видеокамер и другого оборудования;

- новая модель ТНПА ГНОМ состоит из отдельных унифицированных модулей;
- реализована возможность установки одной или двух видеокамер с разрешением не хуже FullHD;

- подводный модуль в зависимости от выбранной конфигурации имеет до 6 степеней свободы.

Изготовлены опытные образцы ТНПА ГНОМ в различных конфигурациях (рис. 2), состоящие из подводного и берегового модулей. Подводный модуль представлен в виде телеуправляемого необитаемого подводного аппарата класса Микро. Модульная структура ТНПА позволит проводить техническое обслуживание отдельных модулей без полного разбора погружного модуля. Погружной модуль поддерживает стабилизацию по курсу, крену, дифференту, глубине.

Характеристики разработанного ТНПА ГНОМ представлены в таблице 2.

Состав подводного модуля:

- 4, 6 или 8 двигателей;
- одна или две 4K/Full HD камеры с управлением фокуса и зума;
- два передних и два задних светильника по 10 Вт, поддерживающих регулировку цветовой температуры;

Таблица 2

Характеристики ТНПА ГНОМ

Габаритные размеры*, мм	420–470 * 380–400 * 270–300
Глубина погружения, м	До 200
Мощность*, Вт	300–600
Масса*, кг	5–10
Количество двигателей*, шт.	4, или 6, или 8
Количество видеокамер*, шт.	1 или 2
Количество осветителей*, шт.	2 или 4

Примечание:* – в зависимости от выбранной конфигурации.

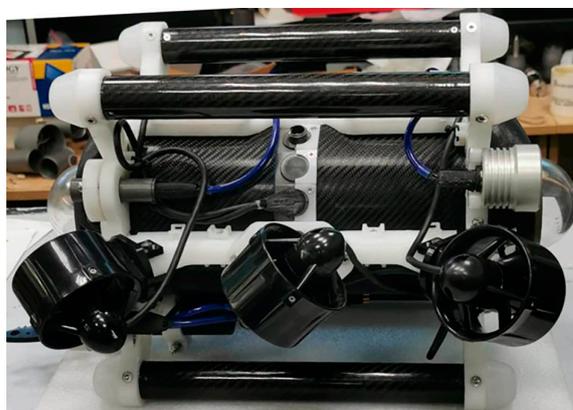


Рис. 2. 6- и 8-моторные версии ТНПА ГНОМ

- манипулятор;
 - альтиметр/эхолот, позволяющий избежать столкновений с различными препятствиями [5];
 - датчик давления;
 - инерциальный измерительный модуль;
 - дополнительное оборудование: ТНПА может содержать гидролокатор кругового обзора, гидроакустическую навигационную систему и т.п.;
 - основной блок электроники, выполненный в виде герметичного цилиндрического корпуса с разъемами на крышке.
- Состав берегового модуля (рис. 3):



Рис. 3. Береговой модуль – береговая станция ТНПА с пультом управления

- кабельная катушка, оснащенная скользящим контактом. Длина кабеля до 300 м;
- блок питания/управления, который выполнен в виде кейса с ЖК-монитором высокой яркости для отображения телеметрии и видеоизображения. Блок управления поддерживает режим записи видеоизображения, скриншоты, комментарии поверх фотографии. Дополнительное оборудование блока управления: клавиатура, манипулятор типа «мышь» и т.п.;
- пульт управления. Пульт управления поддерживает:
 - режим управления фокусом и зумом видеокамеры;
 - управление движительно-рулевым комплексом ТНПА;

- регулировку светильников;
- управление манипулятором.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате работ создан подводный аппарат с возможностью изменения конфигурации. В дальнейшем запланировано проведение натурных испытаний опытных образцов ТНПА в различных конфигурациях, по результатам которых, возможно, потребуются доработка дизайна и конструкции новой модели, доработка программного обеспечения.

На заключительном этапе проекта запланирована разработка эксплуатационной и конструкторской документации.

Заключение

Весьма важно отметить, что аппараты рассчитаны как на профессиональные применения, так и на рынок хобби или развлечений – рыболовов, дайверов и т.д. Поэтому они должны иметь привлекательный дизайн и небольшие вес и габариты. Кроме того, для массового производства необходимы технологичная конструкция и разного рода приспособления типа пресс-форм и др. Созданный аппарат – это шаг в направлении модернизации и оптимизации остальных моделей ТНПА ГНОМ.

Список литературы

1. Шматков А.А., Шматков А.Г., Сергейчиков О.А. Современное состояние производства и перспективы развития серийных российских телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов // Газовая промышленность. 2020. № 2. С. 156-160.
2. Артамонова А.В., Елкин А.В., Розман Б.Я. Конструирование нового поколения телеуправляемых подводных аппаратов – роботов «ПРО-2» // Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции «МСОИ – 2017»: Современные методы и средства океанологических исследований. 2017. Т. 2. С. 279-283.
3. Кишкорева С.С., Пестова А.Э., Аникин А.В. Конструирование беспилотных подводных аппаратов // Енисей Арктика. 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sibsau.ru/scientificpublication/> (дата обращения: 10.09.2024).
4. Виноградов Н.И., Гутман М.Л., Лев И.Г., Нисневич М.З. Привязные подводные системы. Прикладные задачи статики и динамики. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2000. 319 с.
5. Филатов А.Л. Обзор существующих подходов к построению бионических подводных роботов // Технические проблемы освоения Мирового океана. 2019. № 8. С. 167-172.