

**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 = 0,580

№ 7 2021

Пятилетний импакт-фактор  
РИНЦ = 0,286

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.

Подписной индекс по электронному каталогу «Почта России» – ПИ140

Электронная версия размещается на сайте [www.rae.ru](http://www.rae.ru)

The electronic version takes places on a site [www.rae.ru](http://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); 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 = 0,580.**

**Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,286.**

Учредитель, издательство 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)-704-13-41

Факс (845-2)-47-76-77

E-mail: [edition@rae.ru](mailto:edition@rae.ru)

Зав. редакцией Т.В. Шнуровозова

Техническое редактирование и верстка Л.М. Байгузова

Корректор Е.С. Галенкина, Н.А. Дудкина

Подписано в печать – 30.07.2021

Дата выхода номера – 30.08.2021

Формат 60x90 1/8

Типография

ООО НИЦ «Академия Естествознания»

410035, Саратовская область, г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5

Распространение по свободной цене

Усл. печ. л. 10,13

Тираж 500 экз.

Заказ МЖПиФИ 2021/7

© ООО НИЦ «Академия Естествознания»

## СОДЕРЖАНИЕ

**БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ****СТАТЬИ**

ЭРИТРОЦИТАРНЫЙ ГЕМОГЛОБИН: ВИДЫ, ЗНАЧЕНИЯ, АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ <i>Абрашева М.В., Андреева А.И., Виноградова О.Е., Викторovich Н.Н.</i> .....	7
СЕЛЕКЦИЯ АКТИВНЫХ ШТАММОВ ПРОБИОТИЧЕСКИХ БАКТЕРИЙ С ШИРОКИМ СПЕКТРОМ БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И РЕЗИСТЕНТНОСТЬЮ К АНТИБИОТИКАМ <i>Гаврилова Н.Н., Ратникова И.А., Оразымбет С.Э., Алимбетова А.В., Каптагай Р.Ж., Кошелева Л.А., Беликова О.А.</i> .....	12
НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЭПИФИТНЫХ ЛИШАЙНИКАХ ЕЛЬНИКА ПОДЗОНЫ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ <i>Катаева М.Н., Беляева А.И.</i> .....	17
БИОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ, СОВРЕМЕННЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ НЕОНАТАЛЬНОГО СЕПСИСА <i>Керимова Н.Т.</i> .....	22
СОДЕРЖАНИЕ <sup>239+240</sup> Pu В КОМПОНЕНТАХ ЭКОСИСТЕМЫ РЕКИ ЧЕРНОЙ И ОЦЕНКА ЕГО ВЫНОСА В СЕВАСТОПОЛЬСКУЮ БУХТУ <i>Параскив А.А., Проскурнин В.Ю., Малахова Л.В.</i> .....	27
ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ СТРАТЕГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА ВОДОЛАЗНЫХ ДЫХАТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ <i>Яхонтов Б.О.</i> .....	34

**МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ****СТАТЬИ**

РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУРЫ КРЕМ-МАСКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ МАРГАНЕЦСОДЕРЖАЩИХ РУД <i>Чурадзе Л.И., Чагелишвили В.А., Кахетелидзе М.Б., Маградзе Г.Т., Явич П.А., Мсхладзе Л.В.</i> .....	41
---	----

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ****СТАТЬИ**

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ПОДЪЕМОМ РАКЕТЫ-ЗОНДА С УТОЧНЕНИЕМ МОДЕЛИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ <i>Мозжорина Т.Ю., Попов А.С.</i> .....	46
РАЗРАБОТКА ТЕРМОСТОЙКОГО ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ <i>Павлычева Е.А.</i> .....	51
МЕТОДЫ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ОБЪЕМНОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ <i>Шматов А.А.</i> .....	56

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ****СТАТЬИ**ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ  
В ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ*Алымкулов С.А., Исманов Ю.Х., Жумалиев К.М.* ..... 61**ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ****СТАТЬИ**ИССЛЕДОВАНИЕ СУПРАМОЛЕКУЛЯРНОГО КОМПЛЕКСА МОНОАММОНИЙНОЙ СОЛИ  
ГЛИЦИРРИЗИНОВОЙ КИСЛОТЫ (ГЛИЦИРАМА) С L-ГЛУТАМИНОВОЙ КИСЛОТОЙ*Джуманазарова А.С., Матаипова А.К., Маметова А.С., Абдуллаева Ж.Д.* ..... 66СОСТАВ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕНТОНИТА  
БЕШКЕНТСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ*Джусуева М.С., Исматиллаев С.П., Осмонова С.С., Саркелов Ж.С.* ..... 71КОМПЛЕКСНЫЙ ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФЛЮСА, ДИФТАЛАТА БЕТУЛИНОЛА,  
ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА*Полежаева Н.И., Тарасова Л.С., Вольф В.А., Ламберг Е.Р., Логачев Н.И.* ..... 76

---

**CONTENTS**
**BIOLOGICAL SCIENCES**
**ARTICLES**

RED BLOOD CELL HEMOGLOBIN: TYPES, VALUES, ALTERNATIVE  
AND ADDITIONAL FUNCTIONS

*Abrasheva M.V., Andreeva A.I., Vinogradova O.E., Viktorovich N.N.* ..... 7

BREEDING OF ACTIVE STRAINS OF PROBIOTIC BACTERIA WITH A WIDE SPECTRUM  
OF BIOLOGICAL ACTIVITY AND ANTIBIOTIC RESISTANCE

*Gavrilova N.N., Ratnikova I.A., Orazymbet S.E., Alimbetova A.V.,  
Kaptagay R.Zh., Kosheleva L.A., Belikova O.A.* ..... 12

ACCUMULATION OF HEAVY METALS IN EPIPHYTIC LICHENS IN SPRUCE FOREST  
OF MIDDLE TAIGA SUBZONE

*Kataeva M.N., Belyaeva A.I.* ..... 17

BIOCHEMICAL FEATURES AS MODERN LABORATORY PROGNOSTIC CRITERIA  
FOR NEONATAL SEPSIS

*Kerimova N.T.* ..... 22

THE CONTENT OF <sup>239+240</sup>PU IN ECOSYSTEM COMPONENTS OF THE CHERNAYA RIVER  
AND ITS INFLUX TO THE SEVASTOPOL BAY

*Paraskiv A.A., Proskurnin V.Yu., Malakhova L.V.* ..... 27

PHYSIOLOGICAL STRATEGY FOR THE FORMATION OF THE COMPOSITION  
OF DIVING BREATHING MIXTURES

*Yakhontov B.O.* ..... 34

**MEDICAL SCIENCES**
**ARTICLES**

DEVELOPMENT OF A CREAM MASK FORMULATION USING SILICON  
DIOXIDE OBTAINED FROM MANGANESE PRODUCTION WASTE

*Churadze L.I., Chagelishvili V.A., Kakhetelidze M.B.,  
Magradze G.T., Yavich P.A., Mskhiladze L.V.* ..... 41

**TECHNICAL SCIENCES**
**ARTICLES**

SOLUTION OF THE PROBLEM OF OPTIMUM CONTROL OF THE VERTICAL LIFT  
OF THE PROBE ROCKET WITH REFINING THE AERODYNAMIC RESISTANCE MODEL

*Mozzhorina T.Yu., Popov A.C.* ..... 46

DEVELOPMENT OF HEAT-RESISTANT POLYMER COMPOSITE MATERIAL  
FOR TECHNICAL THERMAL INSULATION

*Pavlycheva E.A.* ..... 51

THERMOCYCLIC TREATMENT METHODS FOR VOLUME STRENGTHENING  
STEEL TOOLS

*Shmatov A.A.* ..... 56

---

**PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**


---

**ARTICLES**

- FEATURES OF SPATIAL INFORMATION TRANSMISSION IN HOLOGRAPHIC SYSTEMS  
*Alymkulov S.A., Ismanov Yu.Kh., Zhumaliev K.M.* ..... 61

---

**CHEMICAL SCIENCES**


---

**ARTICLES**

- STUDY OF THE MONOAMMONIUM SALT SUPRAMOLECULAR COMPLEX  
 OF GLYCYRRHIZIC ACID (GLYCYRRAM) WITH L-GLUTAMIC ACID  
*Dzhumanazora A.S., Mataipova A.K., Mametova A.S., Abdullaeva Zh.D.* ..... 66
- THE COMPOSITION AND PHYSIKO-CHEMICAL PROPERTIES OF BENTONITE  
 FROM BESHKENT  
*Dzhusueva M.S., Ismatillaev S.P., Osmonova S.S., Sarkelov Zh.S.* ..... 71
- COMPREHENSIVE THERMAL ANALYSIS OF FLUX, BETULINOL DIPHthalATE,  
 FOR SURFACE MOUNTING TECHNOLOGY  
*Polezhaeva N.I., Tarasova L.S., Volf V.A., Lamberg E.R., Logachev N.I.* ..... 76

СТАТЬИ

УДК 612.111.6

**ЭРИТРОЦИТАРНЫЙ ГЕМОГЛОБИН: ВИДЫ, ЗНАЧЕНИЯ, АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ**

**Абрашева М.В., Андреева А.И., Виноградова О.Е., Викторovich Н.Н.**

*ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», Чебоксары, e-mail: office@chuvsu.ru*

В данной статье описаны плеiotропные эффекты эритроцитарного гемоглобина (Hb) и их значимость для здоровья человека. Гемоглобин наиболее известен как переносчик кислорода, однако его биохимические функции этим не ограничиваются. Рассмотрены следующие аспекты функционирования Hb: каталитические функции, обусловленные гемовым (нитритредуктазная, NO-диоксигеназная, монооксигеназная, алкилгидропероксидазная) и белковым (эстеразная, липоксигеназная) компонентами молекулы; участие в метаболизме оксида азота; образование мембраносвязанной формы Hb и ее роль в регуляции метаболизма эритроцита; физиологические функции продуктов катаболизма гемоглобина (железо, CO, билирубин, пептиды). Особое внимание уделено тому, как коронавирусная инфекция действует на компоненты крови, а также действие MetHb у пациентов с COVID-19; важные факторы, определяющие тяжесть метгемоглобинемии. Причины гипоксии при коронавирусной инфекции и ее последствия. Рассматриваются физиологический (нормальный) и патологический гемоглобин. Приведены примеры нозологических форм. Также указывается значимость применения иммунохимических методов индикации гемоглобина как клинико-диагностического маркера, где большое значение имеет не только изменение количества общего гемоглобина крови, но и отдельных его типов, изменение соотношения которых в клинической практике используют для диагностики различных патологических состояний.

**Ключевые слова:** гемоглобин, активные формы кислорода, антиоксидантная система, иммунохимический метод, эритробластоз, COVID-19, интерлейкины

**RED BLOOD CELL HEMOGLOBIN: TYPES, VALUES, ALTERNATIVE AND ADDITIONAL FUNCTIONS**

**Abrasheva M.V., Andreeva A.I., Vinogradova O.E., Viktorovich N.N.**

*Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, e-mail: office@chuvsu.ru*

This article describes the pleiotropic effects of red blood cell hemoglobin (Hb) and their significance for human health. Hemoglobin is best known as an oxygen carrier, but its biochemical functions are not limited to this. The following aspects of Hb functioning are considered: catalytic functions due to the heme (nitrite reductase, NO-dioxygenase, monooxygenase, alkyl hydroperoxidase) and protein (esterase, lipoxygenase) components of the molecule; participation in nitric oxide metabolism; formation of the membrane-bound form of Hb and its role in the regulation of erythrocyte metabolism; physiological functions of hemoglobin catabolism products (iron, CO, bilirubin, peptides). Special attention is paid to how coronavirus infection affects blood components, as well as the effect of MetHb in patients with COVID-19; important factors determining the severity of methemoglobinemia. Causes of hypoxia in coronavirus infection and its consequences. Physiological (normal) and pathological hemoglobin are considered. Examples of nosological forms are given. The significance of the use of immunochemical methods of hemoglobin indication as a clinical and diagnostic marker is also indicated, where not only the change in the amount of total hemoglobin in the blood is of great importance, but also its individual types, the change in the ratio of which is used in clinical practice for the diagnosis of various pathological conditions.

**Keywords:** hemoglobin, reactive oxygen species, antioxidant system, immunochemical method, erythroblastosis, COVID-19, interleukins

Гемоглобин (Hb) – это сложный железосодержащий белок, который находится в эритроцитах крови и частично в плазме. Hb обеспечивает насыщение тканей организма кислородом и своевременное удаление углекислого газа из активно метаболизирующих клеток [1]. Помимо этого, исходя из своих уникальных химических свойств, гемоглобин является основным компонентом буферной системы крови, который поддерживает кислотно-щелочной баланс в организме, предотвращая алкалоз или ацидоз. Производная Hb – метгемоглобин (MetHb) – обладает пероксидазными свойствами, т.е. способен расщеплять перекись водорода и способен прочно связывать синильную кислоту и дру-

гие токсичные вещества, тем самым снижая степень отравления организма.

Цель исследования – проанализировать современные литературные данные, касающиеся функциональных особенностей Hb, и рассмотреть ситуации, которые связаны с его альтернативными и дополнительными функциями.

**Материалы и методы исследования**

Проведен поиск и анализ публикаций, посвященных альтернативным и дополнительным функциям эритроцитарного Hb в базах данных PubMed, WebofScience.

Гемоглобин – это гетеротетрамёрный белок, состоящий из двух субъединиц  $\alpha$

и двух субъединиц  $\beta$ , каждая из которых содержит один гем, способный обратимо связывать кислород [1]. Гем является небелковым компонентом Hb, который состоит из четырех пиррольных колец и двухвалентного железа. Молекула  $O_2$  связана с ионом Fe (II) гема, соответственно, одна молекула Hb может связывать четыре молекулы  $O_2$ . Структура гема представлена на рис. 1 [2].

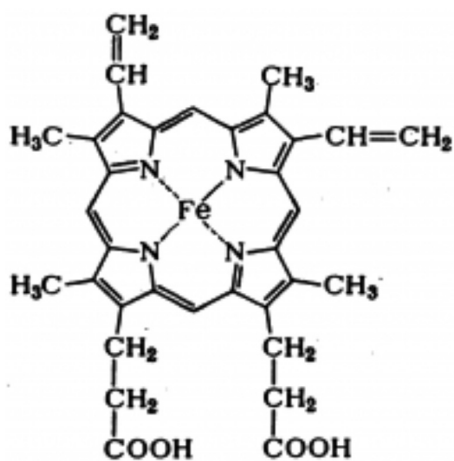


Рис. 1. Структура гема [2]

Гемоглобин переносит связанный с гемом кислород из легких во все ткани организма посредством связанных с оксигенацией сдвигов конформационного равновесия между напряженным состоянием (состояние T; дезоксигенированный) и расслабленным состоянием (состояние R; насыщенный кислородом). R-форма Hb обладает более высоким сродством к кислороду, чем T-форма. На равновесие между T- и R-формами Hb влияют аллостерические эффекторы: 2,3-дифосфоглицерат,  $CO_2$  и ионы водорода [3].

В эритроцитах человека обнаружено несколько форм Hb. Они отличаются друг

от друга последовательностью аминокислот, которые входят в состав глобина.

Выделяют физиологический (нормальный) и патологический Hb.

HbA – это «зрелый» гемоглобин, который имеется у каждого человека. При рождении его содержание составляет 80%, а затем повышается до 95–98%.

HbF – фетальный гемоглобин. Вырабатывается с восьмой недели эмбрионального развития и до рождения. В отличие от HbA, HbF обладает большим сродством к кислороду.

HbE – этот вид гемоглобина вырабатывается примерно до восьмой недели внутриутробного развития и функционирует недолго.

В настоящее время известно более 250 видов патологического Hb. Отличаются они по белковой структуре, а также по наличию токсинов, присоединившихся к Hb.

MetHb – метгемоглобин – содержит трехвалентный ион железа. Он формируется при действии на Hb оксидов азота и хлоратов. MetHb не способен связывать кислород, из-за этого возникает гипоксия тканей.

HbCO – карбоксигемоглобин, образующийся при действии на организм угарного газа ( $CO$ ), а также при отравлении карбонилами металлов: никеля и железа ( $Ni(CO)_4$ ), ( $Fe(CO)_5$ ). HbCO постоянно находится в крови в небольшом количестве, но его концентрация может колебаться от условий и образа жизни.

HbS – гемоглобин серповидно-клеточной анемии. Серповидно-клеточная анемия – это наследственное заболевание системы крови, для которого характерно нарушение образования нормальных цепей гемоглобина. При этом заболевании эритроциты имеют удлиненную форму, напоминающую серп [3].

Состояния, связанные с проявлением в крови мутантных форм Hb, называют гемоглинозами. Классификация гемоглинозов представлена на рис. 2 [4].



Рис. 2. Классификация гемоглинозов [4]



Гемоглинозы делятся на гемоглинопатии и талассемии. Гемоглинопатии характеризуются качественными изменениями структуры Hb. Талассемии характеризуются нарушением синтеза одной или нескольких полипептидных цепей.  $\alpha$ -талассемия характеризуется снижением или отсутствием экспрессии одного или нескольких генов  $\alpha$ -цепей глобина.  $\beta$ -талассемия характеризуется нарушением синтеза или отсутствием  $\beta$ -цепей глобина в молекуле Hb, что приводит к накоплению несвязанных цепей  $\alpha$ -глобина, к неэффективному эритропоэзу и периферическому гемолизу.

*Реакции гемоглобина с оксидом азота и его производными.* Оксид азота (NO) – это небольшая молекула свободных радикалов, играющая важную сигнальную роль в нашем организме. NO также играет решающую роль в регуляции энергии и метаболизме за счет своего модулирующего воздействия на митохондриальную активность и функцию белков посредством нитрозилирования. Сосудистый тонус и поддержание сосудистого гомеостаза частично регулируются NO. Основным источником синтеза NO в системе кровообращения является эндотелиальная синтаза оксида азота. Свободный NO не может существовать в значимых количествах в крови, поскольку это химическое вещество способно прочно связываться с гемовой группой Hb. Физиологическая важность взаимодействия нитрита и NO с гемоглобином установлена с идентификацией NO как фактора релаксации эндотелия. Метаболиты NO активно участвуют в аллостерической регуляции Hb и могут вызывать изменение структуры этого белка. Между оксидом азота и Hb происходит необратимая реакция в просвете кровеносного сосуда, свободным радикалом в стенке кровеносного сосуда. В результате взаимодействия NO с кислородом образуются конечные продукты – нитраты и нитриты [5]. Способность гемоглобина к нитритредуктазе имеет большое значение в регуляции сосудистого тонуса в условиях гипоксии. Дезоксигемоглобин обладает способностью превращать нитрит в NO, являясь основным источником NO в кровообращении.

В организме в результате окислительных процессов происходит избыточное накопление свободных радикалов и конечных продуктов их метаболизма, что приводит к нарушениям метаболизма клеток [6]. Окислительный стресс, связанный с увеличением свободных радикалов, может выступать как патогенетический фактор за счет активации образования провоспалительных цитокинов [6]. В ответ на окислительный стресс совместно регулируемые гены

кодируют синтез белков, которые дезактивируют свободные радикалы.

*Гемоглиновая буферная система.* Для поддержания жизнедеятельности организма важно постоянство pH крови. В этом участвуют буферные системы. Самой мощной буферной системой является гемоглиновая. Кислую часть буфера составляет оксигенированный гемоглобин H-HbO<sub>2</sub>. Он почти в 80 раз легче отдает ионы водорода, чем восстановленный H-Hb.

Изменение кислотности Hb вызывается связыванием гемоглобина H<sup>+</sup> или O<sub>2</sub>. Механизм реализации функции гемоглиновой буферной системы заключается в присоединении или отдаче иона H<sup>+</sup> остатком гистидина в белковой части Hb. Гемоглиновая система участвует в связывании протонов, которые высвобождаются в результате окислительных процессов, а также в протонировании гидрокарбоната оксигемоглобином, с дальнейшим выделением углекислого газа [4]. Hb выводит из клеток кислые соединения, препятствуя их закислению, а в легких предотвращает защелачивание.

*Связывание гемоглобина с мембраной.* Обратимое связывание белков с компонентами мембраны и цитоскелета является одним из механизмов управления клеточным метаболизмом. Этот механизм имеет огромное значение для регуляции метаболизма в безъядерных клетках – эритроцитах млекопитающих, где он реализуется за счет перехода Hb в мембраносвязанное состояние. Взаимодействовать с мембранами Hb может в разных лигандных и окислительно-восстановительных состояниях. Через взаимодействие с основным интегральным белком мембраны эритроцита – белком полосы 3 дезоксигенированный Hb в зависимости от кислородных условий изменяет энергетический обмен, морфологию и деформируемость эритроцитов, высвобождение регуляторов сосудистого тонуса – NO и АТФ. Сигнальную функцию выполняют также и продукты окислительной денатурации Hb – необратимые гемихромы. Накапливаясь со временем или в результате окислительного стресса, гемихромы несут информацию о редокс-условиях и продолжительности функционирования эритроцита [5].

*Методологии количественного определения гемоглобина.* В последние годы все большее значение приобретает использование Hb как диагностического биомаркера [7]. Существуют колориметрические методы, гемоглобинцианидный метод, методики количественного анализа Hb путем электрофореза в агарозе, крахмальном

геле, ацетате целлюлозы и др. Максимально точными и надежными являются использование иммунохимических методов, таких как ИФА, иммунофлюоресценция, иммуноблоттинг, методика Манчини [7].

Одним из важных показателей является концентрация Hb. Снижение концентрации наблюдается при анемиях. Повышение уровня Hb встречается при гемоглобинуриях [2].

Увеличение уровня HbF при рождении наблюдается у недоношенных, а также у новорожденных, родившихся у женщин с поздним гестозом и хронической внутриутробной гипоксией. Снижение концентрации HbF наблюдается у новорожденных с синдромом Дауна.

Рост продукции HbF показан при хронических гипоксиях различного генеза [8].

*Метгемоглобин и карбоксигемоглобин при COVID-19.* После вспышки новой коронавирусной инфекции, уделено место метгемоглобину (MetHb) и карбоксигемоглобину (COHb), поскольку у тяжелобольных пациентов часто наблюдаются повышенные концентрации данных соединений гемоглобина в крови. Подобные соединения относятся к так называемым дисгемоглобинам – дериватам Hb, которые не могут в норме транспортировать кислород, в результате чего наступает тканевая гипоксия.

У пациентов после COVID-19 наблюдается пониженная концентрация Hb. В 2020 г. после проведенных исследований ученые выдвинули предположение, что инфекция взаимодействует в организме с железосодержащим белком и впоследствии разрушает его. Этот вывод был сделан на основе того, что в организмах пациентов с анемией был выявлен в большом количестве гем [8].

Синдром матового стекла, обнаруживаемый в легких на КТ – это скопление [8], атакованного вирусом и утратившего способность к переносу кислорода [8]. Ученые обнаружили, что у пациентов наблюдается низкий уровень ферритина – белка, который является «хранилищем» железа в организме. На фоне недостаточного количества ферритина развивается анемия.

Исследования показали, что коронавирусная инфекция коррелируется появлением в крови большого количества мегакарицитов, в результате чего кровь становится густой. Эритроцитам труднее перемещаться по густой крови, в результате чего возникает гипоксия.

Ученые полагают, что причиной гибели пациентов может быть атака вируса на красный костный мозг, внутренний эндотелий и эритроциты [8].

На сегодняшний день существует множество факторов, доказывающих увели-

чение содержания карбоксигемоглобина и метгемоглобина в крови человека при COVID-19 [9].

Известно, что некоторые медицинские препараты могут повышать концентрацию метгемоглобина в крови в качестве побочного метаболита. Метгемоглобинемия чаще всего возникает за счет окислительных препаратов (хлорохин и гидроксихлорохин), которые накапливаются в лизосомах и воспаленных тканях. Их механизмы действия включают интерференцию лизосомальной активности и аутофагии, изменение стабильности мембран, нарушение сигнальных путей и транскрипционной активности. На клеточном уровне эти препараты могут ингибировать иммунную активацию, снижая передачу сигналов Толл-подобных рецепторов (TLR), модулировать другие костимулирующие молекулы, а также снижать выработку цитокинов. Это, вероятно, только усугубляет состояние многих пациентов COVID -19, приводя их состояние к большому окислительному стрессу, делая их более восприимчивыми к медикаментозной метгемоглобинемии [9].

Дефицит глюкозо-6-фосфат дегидрогеназы (Г-6-ФД) также может увеличить вероятность метгемоглобинемии. Недостаточность Г-6-ФД имеет серьезные патологические последствия в эритроцитах. Для лиц с дефицитом Г-6-ФД инфекция SARS-CoV-2 представляет собой дополнительный фактор риска [8]. Г-6-ФД катализирует реакцию образования восстановленного NADPH, который, в свою очередь, участвует в поддержании антиоксидантной системы защиты эритроцитов от свободных радикалов.

MetHb может образовываться как побочный продукт физиологической реакции в виде адаптивной повышенной передачи сигналов оксида азота (NO) вследствие острой анемии. Анемия может быть связана с инфекцией или системной воспалительной реакцией, называемой «анемией воспаления», как часть физиологической реакции на заболевание [9]. Согласно исследованию Bellmann-Weiler et al. [9] из 259 госпитализированных пациентов с COVID-19 24,7% были анемичны при поступлении, причем большинство страдало воспалительной анемией (68,8%). Во время госпитализации процент пациентов с анемией увеличился (около 68,8% на 7-й день). Значительно более высокая смертность во время госпитализации была также обнаружена у пациентов с анемией при поступлении. Анемия связана с повышенной концентрацией NO, приводящей к вазодилатации. Она предотвращала тканевую гипоксию, но в то же

время вызывала NO-основанное окисление Hb в MetHb. MetHb активирует путь NF-kB в эндотелиальных клетках, связанный с продукцией хемокинов (IL-8) и цитокинов (IL-6). Активация путей NF-kB и MAPK с последующим высвобождением хемокинов IL-8 и хемокинового моноцитарного хемоаттрактантного белка-1 (MCP-1) также наблюдалась в эндотелиальных клетках, подвергнутых воздействию MetHb [8]. Это подчеркивает, что повышение уровня MetHb в крови оказывает влияние на выработку цитокинов/хемокинов – факт, который может иметь особое значение для COVID-19, поскольку при тяжелом течении заболевания наблюдается «цитокиновый шторм». И следует иметь в виду, что гипоксия также вызывает выработку IL-8 и IL-6 [9].

Карбоксигемоглобинемия у пациентов COVID-19 может указывать на увеличение эндогенной продукции СО или снижение выведения СО. Эндогенная продукция СО обусловлена активацией гемоксигеназной ферментной системы, катализирующей распад гема и высвобождение СО в ходе реакции. Затем СО может реагировать с Hb, что приводит к образованию СОHb. К увеличению продукции СОHb приводит и образование свободных радикалов в результате окислительного стресса. Так как анемия и гемолиз происходят в течение заболевания у пациентов COVID-19, гемолитическая анемия также может быть ответственна за повышение СОHb. Поскольку внутриклеточное истощение NADPH и последовательный окислительный стресс с поврежденными эритроцитами (гемолиз) характерны для дефицита Г-6-ФД, неудивительно, что дефицит Г-6-ФД у пациентов COVID-19 связан с повышенным уровнем MetHb и СОHb [8].

При нарушении дыхания происходит снижение элиминации СО. Пациенты с COVID-19 характеризуются нарушением дыхания. Повышенный уровень СОHb может быть объяснен снижением выведения СО и, следовательно, более высокой вероятностью образования СОHb. Механическая

вентиляция легких тоже имеет место быть, поскольку увеличение вдыхаемой фракции кислорода приводит к увеличению концентрации выдыхаемого СО, что приводит к снижению продукции СОHb [9].

### Заключение

По данным Всемирной организации здравоохранения, нарушения, связанные с патологией гемоглобина, представляет собой серьезную проблему общественного здравоохранения. Необходимо разрабатывать программы по скрининговым лабораторным дифференциально-диагностическим тестам, специальные биохимические, иммунологические и морфологические методы определения гемоглобина крови.

### Список литературы

1. Космачевская О.В., Топунов А.Ф. Альтернативные и дополнительные функции эритроцитарного гемоглобина. Обзор // Биохимия. 2019, Т. 84. № 1. С. 3–23.
2. Дементьева И.И., Чарная М.А., Морозов А.Ю. Анемии: руководство (Библиотека врача-специалиста). М.: ГЭОТАР-Медиа, 2013. С. 304.
3. Tejero J., Gladwin M.T. The globin superfamily: functions in nitric oxide formation and decay. *Biol. Chem.* 2014. No. 395. P. 631–639.
4. Виноградов С.Ю., Диндяев С.В., Криштоп В.В., Торшилова И.Ю. 4. Функциональная морфология тканей. Учебно-методическое пособие для студентов медицинских вузов. Иваново, 2011. С. 85.
5. Зинчук В.В., Глебов А.Н. Формирование независимых механизмов кислородсвязывающих свойств крови при окислительном стрессе // Журнал ГрГМУ. 2007. № 1. С. 17–25.
6. Шамитова Е.Н., Викторovich Н.Н. Изучение влияния дефицита витамина А на физиологическое состояние легких // Современные проблемы науки и образования. 2019. № 4. [Электронный ресурс]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=29001> (дата обращения: 06.06.2021).
7. Кривенцев Ю.А., Кривенцева Л.А. Гемоглобины человека как диагностические маркеры // Научное обозрение. Медицинские науки. 2018. № 1. С. 16–20.
8. Пшеничная Н.Ю., Веселова Е.И. COVID-19 – новая глобальная угроза человечеству // Эпидемиология и инфекционные болезни. 2020. Т. 10. № 1. С. 6–13.
9. Bellmann-Weiler R., Lanser L., Barket R., Rangger L., Schapfl A., Schaber M., Fritsche G., Wöll E., Weiss G. Prevalence and predictive value of anemia and dysregulated iron homeostasis in patients with COVID-19 infection. *J. Clin. Med.* 2020. No. 9. P. 2429–2436.

УДК 616.9:616.3:579.6

## СЕЛЕКЦИЯ АКТИВНЫХ ШТАММОВ ПРОБИОТИЧЕСКИХ БАКТЕРИЙ С ШИРОКИМ СПЕКТРОМ БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И РЕЗИСТЕНТНОСТЬЮ К АНТИБИОТИКАМ

Гаврилова Н.Н., Ратникова И.А., Оразымбет С.Э., Алимбетова А.В.,  
Каптагай Р.Ж., Кошелева Л.А., Беликова О.А.

ТОО «Научно-производственный центр микробиологии и вирусологии», Алматы,  
e-mail: oza19921901@mail.ru

Целью исследований была селекция активных штаммов пробиотических бактерий с широким спектром биологической активности и резистентностью к антибиотикам для создания эффективных пробиотиков направленного действия против кишечных инфекций человека. Из лабораторной коллекции молочнокислых и пропионовокислых бактерий отобраны наиболее активные штаммы молочнокислых бактерий *L. plantarum* 2в/А-6, 14д, 14д/19 и 14д/13, *L. acidophilus* 27w и 27w/77, *L. brevis* Б-3/А-26 и Б-3/43, *L. fermentum* 27 и 27А-4, *L. cellobiosus* 37н и 2/20 и пропионовокислых бактерий *P. shermanii* 8, обладающих антагонизмом в отношении тест-культур *Staphylococcus aureus*, *Salmonella gallinarum*, *Mycobacterium B<sub>5</sub>*, *Candida albicans*, *Pasteurella multocida*, *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli* 8739, *Klebsiella pneumoniae* ATCC 700603 и ATCC BAA 2524, *Staphylococcus aureus* 3316 и 9, *Salmonella enteritidis* 35382 и *Pseudomonas aeruginosa* 835. Среди отобранных штаммов выявлены продуценты гидролитических ферментов: амилазы и протеиназы, витаминов группы В, незаменимых и заменимых аминокислот. Изучена резистентность отобранных штаммов молочнокислых и пропионовокислых бактерий к используемым антибиотикам, что позволит при необходимости применять их в комплексной терапии. Отобранные активные штаммы пробиотических бактерий с широким спектром биологической активности и резистентностью к антибиотикам будут использованы для создания эффективных лекарственных пробиотических средств направленного действия.

**Ключевые слова:** молочнокислые, пропионовокислые бактерии, антагонизм, ферменты, витамины группы В, незаменимые и заменимые аминокислоты, резистентность к антибиотикам, пробиотики

## BREEDING OF ACTIVE STRAINS OF PROBIOTIC BACTERIA WITH A WIDE SPECTRUM OF BIOLOGICAL ACTIVITY AND ANTIBIOTIC RESISTANCE

Gavrilova N.N., Ratnikova I.A., Orazymbet S.E., Alimbetova A.V.,  
Kaptagay R.Zh., Kosheleva L.A., Belikova O.A.

LLP "Research and Production Center for Microbiology and Virology", Almaty,  
e-mail: oza19921901@mail.ru

The aim of the research was the selection of active strains of probiotic bacteria with a wide spectrum of biological activity and resistance to antibiotics to create effective probiotics with targeted action against intestinal infections in humans. From the laboratory collection of lactic acid and propionic acid bacteria, the most active strains of lactic acid bacteria *L. plantarum* 2c / A-6, 14d, 14d / 19 and 14d / 13, *L. acidophilus* 27w and 27w / 77, *L. brevis* B-3 / A-26 and B-3/43, *L. fermentum* 27 and 27A-4, *L. cellobiosus* 37n and 2/20 and propionic acid bacteria *P. shermanii* 8, antagonizing test cultures of *Staphylococcus aureus*, *Salmonella gallinarum*, *Mycobacterium B<sub>5</sub>*, *Candida albicans*, *Pasteurella multocida*, *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli* 8739, *Klebsiella pneumoniae* ATCC 700603 and ATCC BAA 2524, *Staphylococcus aureus* 3316 and 9, *Salmonella enteritidis* 35382 and *Pseudomonas aeruginosa* 835. Among the selected strains, producers of hydrolytic enzymes amylase and proteinase, B vitamins, and essential and nonessential amino acids were identified. The resistance of the selected strains of lactic acid and propionic acid bacteria to the antibiotics used has been studied, which will allow, if necessary, to use them in complex therapy. Selected active strains of probiotic bacteria with a wide spectrum of biological activity and antibiotic resistance will be used to create an effective medicinal probiotics with targeted action.

**Keywords:** lactic acid, propionic acid bacteria, antagonism, enzymes, B vitamins, essential and nonessential amino acids, antibiotic resistance, probiotics

Острые кишечные инфекции (ОКИ) – одна из актуальных проблем здравоохранения всех стран [1], в том числе и Казахстана. Так, в Казахстане среди зарегистрированных инфекционных заболеваний в январе – декабре 2019 г. на втором месте после острых инфекций дыхательных путей стояли ОКИ – 22997 случаев [2]. Повсеместная распространенность, высокая частота развития среднетяжелых и тяжелых форм, ос-

ложнений, особенно у детей грудного возраста, определяют необходимость поиска путей оптимизации тактики лечения данной группы заболеваний.

Наиболее частой причиной кишечных инфекций являются такие возбудители, как колибактерии, сальмонеллы, а при определенных условиях и энтеробактер, цитробактер, клебсиелла, протеи, дрожжеподобные грибы, агенты вирусной

природы. Часты случаи возникновения разнообразных воспалительных и септических процессов, обусловленных патогенными кокками, среди которых встречаются *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pyogenes*, *Pneumococcus (Diplococcus) pneumoniae* и др. [3–6].

Сложность лечения инфекционных заболеваний связана с массовым нерациональным использованием антибиотиков и химиотерапевтических препаратов, приводящих к развитию множественной лекарственной устойчивости патогенов [7].

Кроме того, сами антибиотики часто оказывают побочное воздействие на организм человека. Наиболее частыми из них являются токсическое действие, аллергические реакции, дисбактериоз.

Дисбактериозы возникают при длительном лечении антибиотиками широкого спектра действия. При этом гибнут не только патогенные микробы, но и представители нормальной микрофлоры, которые в первую очередь стимулируют иммунную систему, нормализуют ее функционирование на разных уровнях: как местный иммунитет слизистых, так и системный: гуморальный и/или клеточный иммунитет. Нормальная микрофлора участвует также в переваривании пищи и производстве витаминов, ряда незаменимых аминокислот, защищает желудочно-кишечный тракт от возбудителей инфекций. При дисбактериозе некоторые группы возбудителей, невосприимчивые к используемому лекарству и не сдерживаемые больше полезными бактериями-симбионтами, начинают активно размножаться. В данном случае возникает эндогенная суперинфекция, такая как кандидоз. Таким образом, дисбактериоз не только осложняет уже имеющееся заболевание, но и делает организм более восприимчивым к другим заболеваниям [8].

В связи с этим в последнее время в мире для лечения кишечных и урогенитальных инфекций все чаще вместо антибиотиков рекомендуют использовать пробиотики на основе микроорганизмов – симбионтов желудочно-кишечного тракта. Пробиотики относятся к группе медицинских иммунобиологических лекарственных средств на основе живых бактерий, антагонистически активных в отношении патогенных и условно-патогенных микроорганизмов – возбудителей различных инфекционных заболеваний и не оказывающих отрицательного влияния на представителей нормальной микрофлоры человека.

Согласно определению ВОЗ, пробиотики – это живые микроорганизмы, которые при введении в адекватном количестве

оказывают положительный эффект на здоровье организма-хозяина. В 2013 г. Международной научной ассоциацией пробиотиков и пребиотиков (International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics, ISAPP) в данное определение внесены уточнения, согласно которым название «пробиотик» может быть применено только к тем препаратам, которые отвечают следующим требованиям: есть точная информация о входящих в их состав микроорганизмах с указанием штаммов; сохраняется достаточное число жизнеспособных бактерий к концу срока годности; проведены исследования, подтвердившие безопасность и эффективность включенных штаммов [9].

Основными механизмами положительного действия пробиотиков являются: антагонизм к патогенным и условно-патогенным бактериям микрофлоры, укрепление слизистого барьера желудочно-кишечного тракта, а также влияние на модуляцию иммунного ответа [10–12]. Кроме того, полезная микрофлора, заселяющая желудочно-кишечный тракт, участвует в метаболизме белков, углеводов, жиров и других веществ, поступающих в организм, либо образующихся в процессе пищеварения, осуществляет синтез биологически активных веществ: гидролитических ферментов, витаминов группы В и некоторых аминокислот, а также разрушает и выводит токсические вещества из организма человека [13].

Большинство данных относительно применения пробиотиков получены в исследованиях по изучению их эффективности в лечении и профилактике широкого спектра заболеваний желудочно-кишечного тракта, таких как инфекционные диареи, антибиотико-ассоциированные диареи, *Clostridium difficile* ассоциированные диареи, диареи путешественников, гастриты, связанные с инфекцией *Helicobacter pylori*, болезнь Крона, некротический энтероколит, а также в профилактике и/или лечении аллергических заболеваний, предотвращении и/или снижении инфекций урогенитального тракта [14, 15].

Вместе с тем известные лечебно-профилактические пробиотики против кишечных инфекций не всегда эффективны. Причиной этого является недостаточно широкий антимикробный спектр действия, не подбираются антагонисты к конкретным возбудителям заболеваний, а также штаммы – продуценты биологически активных веществ. В связи с изложенным в борьбе с ОКИ актуальными являются исследования по повышению эффективности пробиотических препаратов, расширению их спектра действия за счет правильно подобранного микробного состава.

Целью исследований была селекция активных штаммов пробиотических бактерий с широким спектром биологической активности и резистентностью к антибиотикам для создания эффективных пробиотиков направленного действия против кишечных инфекций человека.

#### Материалы и методы исследования

В работе использовали наиболее активные штаммы молочнокислых и пропионовокислых бактерий, выделенные от здоровых людей, из коллекции лаборатории микробных препаратов.

Для культивирования молочнокислых и пропионовокислых бактерий использовали питательную среду MRS с кобальтом. Культивирование бактерий в жидкой питательной среде проводили в течение 18 ч при температуре 32–37 °С.

Резистентность бактерий к антибиотикам устанавливали методом стандартных дисков, пропитанных антибиотиками, определение численности микроорганизмов – путем ряда последовательных разведений в стерильной водопроводной воде и высева их в агаризованную питательную среду с последующим подсчетом выросших колоний, антагонистическую активность – методом диффузии в агар в отношении различных тест-культур. Ферментативную активность определяли методом высева пробиотических культур на плотные питательные среды с добавлением в среду крахмала в случае определения амилолитической активности и казеина – протеолитической активности. Методом диффузии в агар определяли содержание витаминов группы В с использованием в качестве тест-культур следующих витаминзависимых микроорганизмов: В<sub>3</sub> – *Saccharomyces cerevisiae* Meyen (Ленинградская раса), В<sub>5</sub> – *Zygodospora marxiana* Hansen, В<sub>6</sub> – *Debariomycesdisporus* ВКМУ-1034, В<sub>8</sub> – *Saccharomyces carlsbergensis* (Hansen). Количественное содержание витамина В<sub>12</sub> устанавливали микробиологическим методом по зонам роста витаминзависимого штамма *E. coli* 133-3 и рассчитывали по таблице Дмитриевой. Аминокислоты определяли методом жидкостной хроматографии.

Опыты проводили в трех повторностях. Для математической обработки результатов использовали стандартные методы нахождения средних значений и их средних ошибок. Статистическую достоверность полученных результатов определяли по t-критерию Стьюдента. Различия считали статистически значимыми при  $p < 0,05$ .

#### Результаты исследования и их обсуждение

Первичный отбор произведен из 29 штаммов молочнокислых и пропионовокислых бактерий, находящихся в коллекции лаборатории, по антагонизму к кишечной и сопутствующей инфекции.

Установлено, что ко всем испытанным тест-культурам антагонизм проявили штаммы *L. plantarum* 14д/87 и 14д/19; *L. fermentum* 27; *L. acidophilus* 27w/77. Также выявлены штаммы с высокой антагонистической активностью к взятым тест-культурам за исключением 1–2 из них: *L. plantarum* 14д/А-7, 14д/13, 14д, 2вА-6 и 2в/67; *L. brevis* Б-3/4, Б-3/А-26 и Б-3/43; *L. cellobiosus* 8д<sub>6</sub>, 37н, 2/20 и 7н<sub>1</sub>; *L. acidophilus* 27w/60 и 98.

Наиболее активными антагонистами в отношении *E. coli* являются *L. acidophilus* 27w/60 и 98, *L. plantarum* 14д/19, 2вА-6 и 2в/67, *L. cellobiosus* 7н<sub>1</sub> (зоны подавления роста 13,5–14,5 мм); *S. gallinarum* – *L. acidophilus* 98, *L. plantarum* 14д/19, *L. cellobiosus* 2/20 и 2ж7 (зоны подавления роста 18,0–19,5 мм), *Salmonella sp.* – *L. acidophilus* 27w/77, 27w/60 и 98, *L. cellobiosus* 37н, *L. brevis* Б-3/36, *L. fermentum* 27 (14,5–16,0 мм); *S. aureus* 3316 – *L. plantarum* 14д, 14д/13, 14д/19, 14д/А-7, *L. acidophilus* 27w/77, *L. fermentum* 27А-4 (11,0–12,5 мм); *S. aureus* № 9 – *L. cellobiosus* 2/20 и 2ж7, *L. acidophilus* 27w/77, 27w/60 и 98, *L. brevis* Б-3/А-26 и Б-3/43, *L. fermentum* 27А-4 (14,5–15,5 мм); *C. albicans* – *L. brevis* Б-3/4 и Б-3/6, *L. fermentum* 27, *L. acidophilus* 27w/77, *L. plantarum* 14д/19 и 14д/13 (11,5–12,0 мм); *K. pneumoniae* – *L. plantarum* 14д/87, 14д/19, 14д/А-7, 2вА-6 и 2в/67, *L. acidophilus* 27w/77, *L. cellobiosus* 2ж7 и 2/20 (14,5–15,0 мм); *P. multocida* – *L. plantarum* 14д/19, 2вА-6 и 2в/67, *L. cellobiosus* 37н и 7н, *L. fermentum* 27 (14,0–15,0 мм); *B. subtilis* – *L. plantarum* 14д/19, *L. brevis* Б-3/4 и Б-3/36, *L. fermentum* 27А-4 и 27, *L. acidophilus* 98 (11,0–12,5 мм); *P. aeruginosa* 1182 – *L. plantarum* 14д/19 и 14д, *L. brevis* Б – 3/4, *L. fermentum* 27А-4, *L. acidophilus* 27w/77 (10,0–11,5 мм).

По результатам этого опыта отобраны для дальнейших исследований штаммы молочнокислых бактерий *L. plantarum* 2в/А-6, 14д, 14д/19 и 14д/13, *L. acidophilus* 27w и 27w/77, *L. brevis* Б-3/А-26 и Б-3/43, *L. fermentum* 27 и 27А-4, *L. cellobiosus* 37н и 2/20 и пропионовокислые бактерии *P. shermanii* 8, которые были засеяны в питательную среду после третьего пассажа. После культивирования в течение 24 ч в них определяли антагонистическую активность.

Установлено, что все испытанные штаммы пробиотических бактерий проявили ак-

тивность к тест-культурам *Staphylococcus aureus*, *Salmonella gallinarum*, *Mycobacterium B<sub>5</sub>*, *Candida albicans*, *Pasteurella multocida*, *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli* 8739, *Klebsiella pneumoniae* ATCC 700603 и ATCC ВАА 2524, *Staphylococcus aureus* 3316 и 9, *Salmonella enteritidis* 35382 и *Pseudomonas aeruginosa* 835 и могут использоваться для составления пробиотиков направленного действия.

У штаммов *L. fermentum* 27А-4, *L. acidophilus* 27w, *L. brevis* Б-3/А-26, *L. plantarum* 14д и *P. shermanii* выявлена высокая амилолитическая активность (диаметр зон гидролиза крахмала 20, 30, 36, 30, 35 мм соответственно).

У штаммов *L. plantarum* 2В/А-6, *L. plantarum* 14д/13, *L. brevis* Б-3/А-26, *L. acidophilus* 27W установлена высокая протеолитическая активность (диаметр зон гидролиза казеина 14, 14, 16, 18 мм соответственно).

Важным свойством бактерий-антагонистов является их способность синтезировать витамины группы В (таблица).

В результате исследования витамин-синтетической способности у отобранных нами пробиотических микроорганизмов выявлено, что все они обладают ею в той или иной степени. Наиболее активными продуцентами пантотеновой кислоты (В<sub>3</sub>) являются *P. shermanii* (26 мм), *L. plantarum* 14д/13 (23,0 мм), *L. brevis* Б-3/А-26 и *L. fermentum* 27 (22 мм), *L. plantarum* 14д и *L. brevis* Б-3/43 (21 мм), *L. plantarum* 14д/19 (20 мм). Активными продуцентами никотиновой кислоты (В<sub>5</sub>) являются *P. shermanii*-8 (33 мм), *L. brevis* Б-3/А-26 и *L. fermentum* 27 (23 мм), *L. brevis* Б-3/43(22мм); пиридоксина(В<sub>6</sub>)-*P.shermanii*-8(28мм),

*L. acidophilus* 27w/77 (17,5 мм), *L. plantarum* 14д/19 и *L. acidophilus* 27w (16 мм); инозита (В<sub>8</sub>) – *P. shermanii*-8 (27 мм), *L. plantarum* 14д, *L. brevis* Б-3/А-26 и *L. fermentum* 27 (23 мм); цианокобаламина (В<sub>12</sub>) – *P. shermanii*-8 (3,0 мкг/мл). *L. acidophilus* 27w и 27w/77 (0,60 и 0,62 мкг/мл).

Исследуемые штаммы бактерий отличаются по способности синтезировать аминокислоты.

Установлено, что треонин синтезируют все изученные культуры бактерий, однако более продуктивными являются *L. plantarum* 2в/А-6 (2,36 мг/100 мл) и *P. shermanii*-8 (2,10 мг/100 мл). Синтез валина установлен у монокультур *L. plantarum* 2в/А-6 и *P. shermanii*-8, обеспечивающих его содержание в культуральной жидкости 2,97 и 2,57 мг/100 мл соответственно. Увеличение количества метионина в среде отмечено только при выращивании *L. brevis* Б-3/А-26 (0,92 мг/100 мл) и *L. brevis* Б-3/43 (0,88 мг/100 мл). Синтез лейцина выявлен у всех отобранных бактерий, при этом более активными являются *L. plantarum* 2в/А-6 (4,25 мг/100мл) и *P. shermanii*-8 (3,05 мг/100 мл). Синтез лизина и гистидина установлен у *L. plantarum* 2в/А-6 (1,84 и 1,30 мг/100 мл соответственно).

В процессе исследования выявлена также способность отобранных штаммов пробиотических бактерий синтезировать такие заменимые аминокислоты, как аспарагиновая и глутаминовая кислоты, аргинин, пролин, глицин, аланин, тирозин.

Наибольшее количество аргинина обнаружено у *P. shermanii*-8 (8,2 мг/100 мл) и *L. plantarum* 14д (8,0 мг/100 мл). В исходной питательной среде данная аминокислота отсутствовала.

Синтез витаминов В<sub>3</sub>, В<sub>5</sub>, В<sub>6</sub>, В<sub>8</sub> и В<sub>12</sub> пробиотическими бактериями

Штаммы бактерий	Диаметр зон роста витаминзависимых тест-культур, мм				Содержание витамина В <sub>12</sub> , мкг/мл
	В <sub>3</sub> (пантотеновая кислота)	В <sub>5</sub> (никотиновая кислота)	В <sub>6</sub> (пиридоксин)	В <sub>8</sub> (инозит)	
<i>L. plantarum</i> 2в/А-6	18,0 ± 0,4	16,0 ± 0,2	16,0 ± 0,3	15,0 ± 0,2	0,18 ± 0,3
<i>L. plantarum</i> 14д	21,0 ± 0,5	10,5 ± 0,2	15,0 ± 0,2	23,0 ± 0,4	0,18 ± 0,02
<i>L. plantarum</i> 14д/13	23,0 ± 0,4	12,0 ± 0,1	15,0 ± 0,3	21,0 ± 0,4	0,18 ± 0,02
<i>L. plantarum</i> 14д/19	20,0 ± 0,5	12,0 ± 0,3	16,0 ± 0,3	22,0 ± 0,3	0,19 ± 0,03
<i>L. acidophilus</i> 27w	16,5 ± 0,5	16,5 ± 0,2	16,0 ± 0,3	15,0 ± 0,2	0,60 ± 0,03
<i>L. acidophilus</i> 27w/77	18,0 ± 0,3	16,0 ± 0,3	17,5 ± 0,2	14,0 ± 0,3	0,65 ± 0,03
<i>P. shermanii</i> -8	26,0 ± 0,6	33,0 ± 0,6	28,0 ± 0,6	27,0 ± 0,2	3,00 ± 0,03
<i>L. brevis</i> Б-3/А-26	22,0 ± 0,4	23,0 ± 0,4	12,5 ± 0,1	23,0 ± 0,4	0,19 ± 0,01
<i>L. brevis</i> Б-3/43	21,0 ± 0,3	22,0 ± 0,2	14,0 ± 0,2	22,0 ± 0,3	0,18 ± 0,01
<i>L. fermentum</i> 27	22,0 ± 0,4	23,0 ± 0,2	15,0 ± 0,2	23,0 ± 0,3	0,17 ± 0,01
<i>L. cellobiosus</i> 2/20	15,0 ± 0,3	16,0 ± 0,2	15,0 ± 0,1	15,0 ± 0,3	0,17 ± 0,01

Наибольшее количество глутаминовой кислоты установлено у штаммов *L. plantarum* 2в/А-6, *L. brevis* Б-3/А-26 и *P. shermanii*-8 (от 8,0 и 8,5 мг/100 мл), серина – у *L. plantarum* 2в/А-6 (2,72 мг/100 мл) и *P. shermanii*-8 (2,0 мг/100 мл). Эти же штаммы являются лучшими продуцентами пролина, глицина, тирозина.

Изучена резистентность отобранных штаммов молочнокислых и пропионовокислых бактерий к используемым антибиотикам.

Установлено, что большинство исследованных штаммов бактерий чувствительны к ципрофлоксацину (30 мкг). Однако данный антибиотик не влияет на рост *L. plantarum* 2в/А-6, *L. acidophilus* 27w и 27w/77, *L. fermentum* 27. Хлорамфеникол (30 мкг) не подавляет рост *L. plantarum* 2в/А-6 и 14д/13, *L. acidophilus* 27w, *P. shermanii*-8, *L. brevis* Б-3/43 и *L. fermentum* 27, офлоксацин (5 мкг) – *L. plantarum* 2в/А-6, *L. acidophilus* 27w, *P. shermanii*-8, *L. brevis* Б-3/43 и *L. fermentum* 27.

Не оказывают влияние на рост всех испытанных пробиотических микроорганизмов антибиотики цефтриаксон (30 мкг), триметоприм (30 мкг), котримоксазол (25 мкг), канамицин (30 мкг). Угнетение роста у штаммов *L. plantarum* 2в/А-6 и 14д/13 происходит под влиянием диоксицилина гидрохлорид (30 мкг), у штаммов *L. plantarum* 2в/А-6 и 14д/13, *L. acidophilus* 27w/77 и *L. cellobiosus* 2/20 – антибиотика тетрациклина (30 мкг). Угнетение роста *L. acidophilus* 27w, *P. shermanii*-8 и подавление роста *L. cellobiosus* 2/20 и *L. fermentum* 27 происходит под влиянием гентамицина (30 мкг).

### Заключение

Таким образом, проведена селекция активных штаммов пробиотических бактерий с широким спектром биологической активности и резистентностью к антибиотикам для создания эффективного лекарственного пробиотического средства направленного действия против кишечных инфекций человека.

### Список литературы

1. World Health Organization (WHO). World health statistics 2011. Geneva. WHO, 2011. 170 p.
2. Комитет по статистике. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.zakon.kz/5008014-zabolevaemost-naseleniya-respubliki.html> (дата обращения: 15.06.2021).
3. Лобзин Ю.В., Захаренко С.М., Плотников К.П. Дисбактериоз, или полезны ли антибиотики. СПб.: Спец. Лит, 2002. 190 с.
4. Gardiner Gillian E., Heinemann Christine, Baroja Miren L., Bruce Andrew W., Beuerman Dee, Medrenas Joaquin. Reid Gregor. Oral administration of the combination of the probiotic *Lactobacillus rhamnosus* GR-1 and *L. fermentum* RC-14 for treatment of intestinal diseases in humans. Int. Dairy J. 2002. V. 12. № 2–3. P. 191–196.
5. Савицкая К.И., Мельникова Е.Ф., Воробьев А.А., Загальская Н.В. Микрофлора желчи при хроническом панкреатите // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунологии. 2003. № 1. С. 14–17.
6. Пат. 04000555 WO. МПК<sup>7</sup> А61К 35/74, С12 N/20. Штаммы *Lactobacillus*, способствующие предотвращению диареи, вызванной ротавирусами / Reniero Roberto, Bruesson Harald, Rochat Florence, Vonder Weid Thierry, Blum-Sperisen Stephanie. опубл. 05.06.2004.
7. Намазова-Баранова Л.С., Баранов А.А. Антибиотикорезистентность в современном мире // Педиатрическая фармакология. 2017. № 14 (5). С. 341–354. DOI: 10.15690/pf.v14i5.1782.
8. Конакова А.В., Кушаква К.А. Влияние антибиотиков на организм человека // Аллея науки. 2019. Т. 1. № 9 (36). С. 91–94.
9. Глобальные практические рекомендации Всемирной гастроэнтерологической организации. Пробиотики и пребиотики / Февраль 2017. WGO Logo without Borders Guidelines Logo. 1–37 с.
10. Corr S.C., Hill C., Gahan C.G. Understanding the mechanisms by which probiotics inhibit gastrointestinal pathogens. Adv Food Nutr Res. 2009. Vol. 56. P. 1–15.
11. Rao R.K., Samak G. Protection and Restitution of Gut Barrier by Probiotics: Nutritional and Clinical Implications. Curr Nutr Food Sci. 2013. Vol. 9 (2). P. 99–107.
12. Wells J.M. Immunomodulatory mechanisms of lactobacilli. Microb Cell Fact. 2011. Vol. 10 (Suppl. 1). P. S17. DOI: 10.1186/1475-2859-10-S1-S17.
13. Николаева С.В., Золотарев Ю.В., Горелов А.В. Применение пробиотиков в медицинской практике // Медицинское обозрение. 2018. № 8 (II). С. 84–87.
14. Sniffen J.C., McFarland L.V., Evans C.T., Goldstein E.J.C. Choosing an appropriate probiotic product for your patient: An evidence-based practical guide. PLoS ONE. 2018. № 13 (12). e0209205. DOI: 10.1371/journal.pone.0209205HYPERLINK.
15. Probiotics and prebiotics. World Gastroenterology Organisation Global Guidelines. 2017. Accessed October 10. 2019. [Электронный ресурс]. URL: Available at: <https://www.world-gastroenterology.org/guidelines/global-guidelines/probiotics-and-prebiotics> (дата обращения: 15.06.2021).



УДК 574.472:582.29

## НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЭПИФИТНЫХ ЛИШАЙНИКАХ ЕЛЬНИКА ПОДЗОНЫ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ

Катаева М.Н., Беляева А.И.

Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург, e-mail: mkmarikat@gmail.com

Изучено содержание тяжелых металлов в двух видах эпифитных лишайников *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. и *Usnea dasopoga* (Ach.) Nyl. (Parmeliaceae). Район исследования расположен на Ладожско-Онежском перешейке, Ленинградская область, в подзоне средней тайги вне зон действия локального атмосферного загрязнения. Лишайники собирали в ельнике кустарничково-зеленомошном на разных форофитах, на ветвях ели европейской и стволах березы повислой. Содержание тяжелых металлов в лишайниках характеризует отсутствие техногенного влияния. При химическом анализе в лишайниках обнаружены фоновые концентрации металлов. Тип форофита влияет на накопление Zn, Mn и Fe. Концентрации Zn в лишайниках на стволах березы выше по сравнению с ветвями ели в *H. physodes* в 1,87 раз, в *U. dasopoga* в 2,57 раз. Содержание Mn в лишайниках на стволах березы выше до 2,03 раз. Более высокие концентрации тяжелых металлов накапливает *Hypogymnia physodes*. Выявлено влияние условий местообитаний на состав лишайников. В листьях березы, хвое ели и субстратах обнаружены фоновые концентрации. Показано, что концентрации химических элементов в обоих лишайниках изменяются под влиянием форофита.

**Ключевые слова:** эпифитные лишайники, средняя тайга, тяжелые металлы, *Hypogymnia physodes*, *Picea abies*, *Betula pendula*

## ACCUMULATION OF HEAVY METALS IN EPIPHYTIC LICHENS IN SPRUCE FOREST OF MIDDLE TAIGA SUBZONE

Kataeva M.N., Belyaeva A.I.

Komarov Botanical Institute RAS, Sankt-Petersburg, e-mail: mkmarikat@gmail.com

The content of heavy metals in two species of epiphytic lichens *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl and *Usnea dasopoga* (Ach.) Nyl. (Parmeliaceae) was studied. The study area is located in the Ladoga-Onega Isthmus, Leningrad Region in the middle taiga subzone outside the zones of local atmospheric pollution. Lichens were collected in a dwarf-shrub green moss spruce forest from different phorophytes, on the branches of European spruce and on the trunks of silver birch. The content of heavy metals in lichens characterizes the absence of technogenic impact. As a result of the analysis, background concentrations of metals in lichens were found. The phorophyte type affects the accumulation of zinc, manganese and iron. The content of Mn, Zn and Fe in lichens is influenced by biotic factors and the type of phorophyte. The Zn concentration on birch trunks is 1,87 times higher in *H. physodes*, and 2,57 times higher in *U. dasopoga* than in these lichens on spruce branches. On birch trunks, Mn concentrations in lichens is higher up to 2,03 times. *Hypogymnia physodes* accumulates higher concentrations of heavy metals. The influence of habitat conditions on the accumulation of metals in lichens was revealed. Background concentrations were found in birch leaves, spruce needles, and substrates. It was shown that the concentration of chemical elements in both lichens changes under influence of the phorophyte.

**Keywords:** epiphytic lichens, middle taiga, heavy metals, *Hypogymnia physodes*, *Picea abies*, *Betula pendula*

Поступление веществ с атмосферными выпадениями под полог леса – источник питания для растений. Древесный полог задерживает часть осадков и обогащает их химическими элементами, влияя на качественные и количественные показатели состава осадков в лесных сообществах. В хвойных фитоценозах тайги, в зависимости от их типов и времени вегетационного периода, осадки концентрируются кронами. Под пологом сформировавшегося фитоценоза сглаживается радиационный режим и формируется более благоприятный для роста и развития лишайников влажный микроклимат. В ельниках сильно снижается освещенность, в кронах концентрируются осадки, ослабляется скорость ветра. В лесных сообществах мало изучено влияние вида форофита на химический состав эпифитных лишайников. Широкая экологическая амплитуда отдельных видов лишайников по от-

ношению к субстрату дает возможность выявить изменчивость их микроэлементного состава в разных сообществах и на разных древесных породах. Закономерности эколого-ценотической приуроченности эпифитных лишайников в среднетаежных хвойных лесах региона известны далеко не полностью. Ель европейская в этом отношении менее изучена, нужны сведения о влиянии экологических факторов на химический состав лишайников в фитоценозе и экологические предпочтения видов лишайников. Ель европейская и береза повислая являются одними из основных лесообразующих видов в регионе. Экологических исследований лишайников на этих древесных породах проведено недостаточно.

Цель исследования – дать характеристику фоновых значений концентраций металлов в лишайниках, растущих в ельнике на разных видах форофитов.

### Материалы и методы исследования

Концентрации тяжелых металлов в эпифитных лишайниках *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Usnea dasopoga* (Ach.) Nyl. изучали в таежном фитоценозе на северо-западе России в южной части Ладожско-Онежского перешейка, юго-восток побережья Ладожского озера, вне зон действия атмосферного загрязнения. Лишайники собраны в ельнике кустарничково-зеленомошном в подзоне средней тайги в августе 2018–2019 гг. Район исследования расположен в бассейне р. Свирь на северо-востоке Ленинградской области, Лодейнопольский район. Высота расположения фитоценоза над уровнем моря 26 м. Район исследования расположен на равнинной территории, типичной для условий средней тайги. Древостой состоит из ели европейской *Picea abies* (L.) Karst. Хвойные фитоценозы развиваются со сменой пород, и в данном сообществе кроме ели, присутствует также береза повислая *Betula pendula* Roth. В мохово-лишайниковом ярусе распространен *Pleurozium schreberi*, другие зеленые мхи, лишайник *Peltigera aphthosa*. Возраст сообщества 90–110 лет, без признаков повреждения пожаром. Видовой состав эпифитных лишайников в этом ельнике довольно разнообразен, присутствуют виды рода *Bryoria*, *Platismatia glauca*.

Образцы лишайников собирали по видам. Высота сбора 1,3 м. Для сравнения выбраны два типа местообитаний лишайников на ели, в нижней части кроны и на стволах березы. Субстратом для лишайников являлась древесина нижних сухих ветвей в кроне ели толщиной 0,7–1,0 см и гладкая кора стволов березы. Образцы лишайников собирали на 2–3 деревьях вида форофита. Длина талломов *Usnea dasopoga* – 8–15 см, размер *Hypogymnia physodes* – 4–5 см. В местообитаниях лишайников собирали пробы хвои ели и листьев березы, коры ели и березы, сухие ветви ели. Материал после сбора помещали в бумажные пакеты. Образцы лишайников высушивали до воздушно-сухого веса, озоляли при 450 °С в муфеле, золу растворяли при нагревании в 2N HCl. Концентрации химических элементов измеряли на ААС Квант-АФА, Россия. Определения делали в двух аналитических и биологических повторностях. Для обработки данных использовали стандартный пакет Microsoft Excel 2010.

### Результаты исследования и их обсуждение

Эпифитные лишайники *Hypogymnia physodes*, *Usnea dasopoga* – обычные виды

в районе исследования, которые встречаются в лесных сообществах на лиственных и хвойных породах. Среднетаежные хвойные леса на юго-восточном побережье Ладожского озера не испытывают прямого влияния техногенного загрязнения от локальных источников промышленных выбросов. В результате анализа лишайников не выявлено значительного загрязнения тяжелыми металлами. При сходстве содержания этих элементов в двух видах лишайников, концентрации Zn и Mn в них в местообитаниях на стволах березы и ветвях ели отличаются более значительно. На обоих форофитах лишайники накапливают низкие концентрации Ni и Cu, которые варьируют слабо (табл. 1).

На стволах березы повислой характерно накопление высоких концентраций цинка (Zn) в лишайниках, в *H. physodes* – 94,1 мг/кг и *U. dasopoga* – 63,2 мг/кг, что в 1,87 раз и 2,57 раз соответственно выше содержания элемента в этих видах лишайников на ветвях ели в нижней части кроны. Другой отличительной особенностью состава лишайников на стволах березы является накопление довольно высоких концентраций марганца (Mn) в обоих видах в пределах 749–819 мг/кг. По сравнению со средним содержанием на ветвях ели, в местообитаниях на стволах березы концентрации Mn в *H. physodes* повышены в 2,02 раза, *U. dasopoga* – в 2,03 раза. Содержание Mn в среднем составе лишайников, растущих на березе, значимо выше. Осадки, проходящие через кроны березы и стекающие по стволам, обогащаются цинком и марганцем, что приводит к накоплению этих элементов в лишайниках. В листьях березы и хвое ели накапливается Mn [1]. Состав осадков под пологом леса связан с содержанием химических элементов в листьях и хвое. Распределение осадков под кронами деревьев по площади фитоценоза происходит неравномерно и находится в зависимости от развития древесного полога. Крона ели концентрирует осадки. Поступление осадков возрастает по краям кроны ели, в средней части кроны ели и около ствола больше осадков задерживается. На край кроны ели приходится поступление большего количества осадков, в стволовой части поступает их меньшая часть, характерен сток дождевых осадков по краям кроны. На ветвях по краю кроны ели складываются благоприятные условия для роста и питания лишайников. Кроме этого, в умеренных широтах такие субгоризонтальные поверхности за счет расположения солнца над горизонтом лучше освещены летом, что создает благоприятные условия для поселения и развития лишайников.

Таблица 1

Средние концентрации металлов в лишайниках ельника на разных форофитах, мг/кг

Вид	Ni	Cu	Cd	Pb	Fe	Mn	Zn
<i>Сухие ветви ели</i>							
<i>Hypogymnia physodes</i>	1,01 ± 0,21	2,53 ± 0,15	0,23 ± 0,02	4,99 ± 1,2	205 ± 18,6	405 ± 115	50,1 ± 2,0
<i>Usnea dasopoga</i>	0,62 ± 0,16	1,83 ± 0,39	0,11 ± 0,01	1,99 ± 0,28	65,8 ± 8,2	368 ± 125	24,6 ± 2,1
<i>Стволы березы</i>							
<i>Hypogymnia physodes</i>	1,14 ± 0,17	3,04 ± 0,19	0,51 ± 0,19	4,74 ± 0,93	199 ± 18	819 ± 6,40	94,1 ± 26,5
<i>Usnea dasopoga</i>	0,72 ± 0,04	1,77 ± 0,08	0,32 ± 0,02	1,81 ± 0,08	50,9 ± 6,9	749 ± 77,8	63,2 ± 8,2
<i>Средние концентрации в видах лишайников на форофите</i>							
Ель, среднее и ошибка средней	0,82 ± 0,19	2,18 ± 0,35	0,17 ± 0,06	3,49 ± 1,50	135 ± 69,6	387 ± 18,5	37,4 ± 12,7
Береза, среднее и ошибка средней	0,93 ± 0,21	2,41 ± 0,63	0,41 ± 0,09	3,28 ± 1,47	125 ± 74,0	784 ± 35,0	78,6 ± 15,5

Химический состав лишайников чаще изучается при влиянии загрязнения и менее известно влияние на лишайники природных факторов, таких как форофит. Листья березы накапливают значительное количество Zn и Mn [1, 2]. Содержание Zn в листьях березы в ельнике при отсутствии техногенного загрязнения составляет 156 мг/кг, концентрация Mn достигает 1600 мг/кг. Под кронами возрастает поступление водорастворимых форм Zn и Mn с осадками, что является источником для накопления в лишайниках и изменения их состава на разных форофитах. Дождевые осадки после прохождения через кроны березы вымывают эти элементы [3]. Вид *H. physodes* принадлежит к листоватой жизненной форме и накапливает более высокие концентрации всех изученных элементов, по сравнению с кустистым видом *U. dasopoga*, растущим в тех же условиях. Содержание свинца (Pb) отличается сильнее в связи с принадлежностью к разным жизненным формам изучаемых видов лишайников, чем в условиях субстратов разных форофитов в экологически различных местообитаниях. На ветвях ели различия между видами *H. physodes* и *U. dasopoga* по содержанию Pb составляют 2,50 раза, на стволах березы – 2,61 раза. Концентрации свинца (Pb) также слабо отличаются в лишайниках на разных субстратах, более значительные отличия обнаруживаются по видам. По содержанию железа (Fe) выявлен такой же характер различий между видами

лишайников на одном типе субстрата. *H. physodes* по концентрации Fe в 3,11 раза превосходит *U. dasopoga* на ветвях ели, на стволах березы – в 3,90 раза. В местообитаниях на краях ветвей ели содержание Fe в *U. dasopoga* на 29,2% выше.

Эпифитные лишайники представляют собой чувствительный компонент фитоценоза по отношению к действию атмосферного загрязнения, и разные виды обладают неодинаковой устойчивостью к действию тяжелых металлов. При накоплении тяжелых металлов ионообменные свойства клеточных стенок рассматриваются как главный механизм, который непосредственно влияет на поступление элементов минерального питания в таллом лишайников [4]. К числу наиболее опасных металлов, загрязняющих экосистемы все более широко с дальним переносом выбросов, относится Cd.

Обнаружено, как и в случае накопления цинка, на стволах березы лишайники накапливают больше кадмия (Cd). Согласно полученным данным, в лишайниках на стволах березы отмечается повышение содержания Cd в среднем составе биомассы лишайников в 2,41 раза, от 0,17 мг/кг до 0,41 мг/кг. Данная особенность, по-видимому, связана с питанием лишайников обогащенными микроэлементами стоком по стволу березы, вымыванием элемента из кроны. Есть данные, характеризующие накопление Cd в листьях березы в фоновых условиях произрастания до 0,67 мг/кг [2]. По-видимому, поступление Cd в лишайники с осадками

на стволах березы происходит как за счет концентрирования в кронах с осадками, так и вымывания из листьев. Концентрации Cd в лишайниках в ельнике обнаружены низкие (0,11–0,51 мг/кг), и они могут рассматриваться как фоновые.

В изучаемом ельнике концентрации химических элементов в листьях березы несколько выше, по сравнению с хвоей ели. Листья березы накапливают Zn до 135 мг/кг (табл. 2).

капливают более высокие концентрации Zn, по сравнению с лишайниками. При отсутствии влияния загрязнения на фитоценоз можно выявить особенности химического состава лишайников, связанные с влиянием на них экологических условий. В фитоценозе условия местообитаний лишайников различаются. В эпифитных лишайниках кустистой и листоватой жизненных форм выявлено изменение содержания элементов при близком к горизонтальному расположе-

**Таблица 2**  
Средние концентрации металлов в компонентах елового фитоценоза, мг/кг

Объект	Ni	Cu	Cd	Pb	Fe	Mn	Zn
Листья березы	2,35 ± 1,48	2,60 ± 0,29	0,184 ± 0,01	0,47 ± 0,09	37,7 ± 8,05	1880 ± 65	135 ± 0,80
Хвоя ели, 2-летняя	0,67 ± 0,03	1,13 ± 0,02	0,020 ± 0,01	0,40 ± 0,03	14,3 ± 0,20	1360 ± 46	32,0 ± 0,85
Кора ели	0,27 ± 0,04	2,41 ± 0,59	0,250 ± 0,08	1,84 ± 0,39	41,0 ± 6,36	342 ± 16,9	93,7 ± 8,90
Кора березы	0,20 ± 0,05	2,48 ± 0,05	0,055 ± 0,01	0,80 ± 0,29	12,2 ± 8,65	366 ± 10,0	37,9 ± 0,41
Сухие ветви ели	0,27 ± 0,09	0,94 ± 0,11	0,06 ± 0,004	2,65 ± 0,45	22,4 ± 8,37	62,4 ± 4,03	11,1 ± 3,50

В листьях березы концентрация Zn в 4,21 раза выше содержания в хвое ели, что коррелирует с накоплением Zn в лишайниках на березе. Марганец довольно интенсивно накапливается в ассимилирующих органах обоих форофитов, в листьях и хвое. Концентрация Mn в листьях березы выше, 1880 мг/кг, что соответствует составу лишайников, растущих на стволах березы. При анализе двулетней хвои ели в кроне в местообитаниях лишайников, обнаружено значительное содержание Mn – 1360 мг/кг, что согласуется с данными о накоплении Mn в многолетней хвое. Концентрации Ni и Cu в листьях и хвое следует рассматривать как фоновые, они не превышают 3,0 мг/кг. Содержание Pb (0,40–0,47 мг/кг) в них также фоновое. Хвоя ели содержит очень низкие следовые концентрации Cd. Состав обоих видов лишайников на березе с более высоким накоплением Cd согласуется с тенденцией к повышению концентраций элемента в листьях. Субстраты лишайников – сухие ветви ели, также кора стволов не загрязнены металлами.

По сравнению с листьями березы и хвоей ели, лишайники накапливают более высокие концентрации Pb и Fe, сопоставимые с листьями березы концентрации Cd, Ni, Cu. В лишайниках менее высокие содержания Mn, относительно листьев березы и хвои ели. В хвое ели выявлены концентрации Ni и Cu, сравнимые со значениями в лишайниках, в хвое меньше Cd. Листья березы на-

нии местообитаний на ветвях ели и при вертикальном на стволах березы. На ветвях ели лишайники содержат более высокие концентрации Fe. В лишайниках на разных форофитах различается накопление Zn и Mn.

Химический состав эпифитных лишайников тесно связан с их атмосферным способом питания и поступлением осадков в фитоценозе. Направлением исследований на фоновых территориях остается определение уровня естественного варьирования и выявление видовой специфики накопления тяжелых металлов в лишайниках. Получение таких данных позволяет характеризовать влияние крон в пологом древостое фитоценоза на атмосферные осадки и выявлять степень загрязнения лишайников и особенности накопления металлов разными видами и жизненными формами. В работе показано, что более сильно в лишайниках изменяется содержание Mn, компонента состава хвои и листьев древесного полога, и Zn и Fe. Данные для лишайников на стволах березы могут использоваться для оценки фоновых концентраций металлов, за исключением Zn, в связи с накоплением листьями березы.

При естественном развитии фитоценоза происходит также развитие сообществ лишайников. Присутствие в сообществе видов лишайника кустистой жизненной формы *Usnea dasopoga* характеризует долговременное стабильное развитие кустарничково-зеленомошного ельника и в целом характеризует его в качестве мало нарушенного

загрязнением и благоприятного для роста и развития эпифитных лишайников. Лишайник *Peltigera aphthosa* в мохово-лишайниковом покрове также является индикатором длительного развития и отсутствия нарушений пожаром сообщества ельника. Многие виды эпифитных лишайников, особенно кустистой жизненной формы, крайне чувствительны к резким изменениям условий среды обитания, в том числе к нарушениям состояния лесных сообществ при атмосферном загрязнении, что является причиной резкого сокращения их разнообразия и встречаемости. В лесных сообществах вблизи Ладожского озера имеются перспективные охраняемые территории с довольно высоким видовым разнообразием лишайников [5, 6]. В данном регионе мало данных о степени загрязнения лишайников и возможностях сохранения их флоры и факторах развития. В этом отношении более изучены виды лишайников на смежной территории в Карелии в заповеднике «Кивач». Кроме этого, в регионе неизвестны фоновые концентрации в лишайниках, встречающихся на разных форофитах. Полученные данные позволяют установить фоновые значения и выявить особенности накопления элементов лишайниками разных жизненных форм.

Для мониторинга загрязнения лесных сообществ около Ладожского озера необходимы данные фоновых концентраций элементов в лишайниках. В этот район могут поступать выбросы промышленности от мегаполиса Санкт-Петербурга и близко расположенных территорий Карелии и юга Финляндии. Нужны данные о возможностях сохранения эпифитных лишайников в условиях атмосферного загрязнения и оптимальных условиях роста лишайников. В результате исследования в лишайниках выявлены довольно низкие концентрации тяжелых металлов. Определены естественные изменения концентраций металлов в лишайниках, растущих на разных видах форофитов для характеристики фоновых значений. Накопление металлов (Cd, Fe, Mn, Zn) в лишайниках в значительной степени обусловлено влиянием вида форофита. Содержание тяжелых металлов в двух видах эпифитных лишайников различается. В разных условиях местообитаний вид *H. physodes* проявляет более высокую способность к биоаккумуляции металлов.

### Заключение

При поступлении загрязняющих веществ с осадками компоненты выбросов обнаруживаются в составе природных объектов на окружающих территориях. Изучена аккумуляющая способность видов лишайни-

ков *Hypogymnia physodes* и *Usnea dasopoga*, растущих на разных форофитах в ельнике кустарничково-зеленомошном. Признаков влияния загрязнения в фитоценозе не обнаружено, концентрации тяжелых металлов в лишайниках низкие, и их следует рассматривать в качестве фоновых, характерных для естественного ненарушенного состояния фитоценозов. Широко распространенные виды лишайников создают основу формирования сообществ эпифитных лишайников, и на их примере можно выявить общие закономерности изменений элементного состава лишайников. На березе лишайники содержат более высокие концентрации Zn, превосходящие до 2,57 раз значения на ветвях ели, Mn до 2,03 раз. Листья березы содержат более высокие концентрации Mn и Zn, что соответствует более сильному накоплению этих элементов в обоих видах лишайников на стволах березы. Оба вида лишайников содержат довольно низкие концентрации Cd, Pb, Ni, Cu. Не обнаружено загрязнения листьев березы, хвои ели, эпифитных лишайников и субстратов в ельнике. Концентрации элементов в лишайниках характеризуют фоновые значения при отсутствии влияния атмосферного загрязнения. Результаты можно применять для изучения загрязнения лишайников в лесных сообществах.

*Работа выполнена по плановой теме НИР 2021–2023 гг. № 121032500047-1 «Растительность европейской части России и северной Азии: разнообразие, динамика и принципы организации», «Разнообразие, динамика и принципы организации растительных сообществ Европейской России» АААА-А19-119030690058-2.*

### Список литературы

1. Сухарева Т.А. Особенности накопления химических элементов древесными растениями северотаежных лесов на фоновых и техногенно нарушенных территориях // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2017. № 14. С. 438–441.
2. Кузнецова Т.Ю., Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Аккумуляция тяжелых металлов в различных органах и тканях березы в зависимости от условий произрастания // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 1. С. 86–94.
3. Шильцова Г.В., Ласточкина В.Г. Влияние погоды основного и березового леса на химический состав осадков в заповеднике «Кивач» // Труды Карельского научного центра РАН. 2006. № 10. С. 180–184.
4. Мейчик Н.Р., Любимова Е.Г., Ермаков И.П. Ионобменные свойства клеточной стенки кустистого лишайника *Cladonia rangiferina* // Физиология растений. 2010. Т. 57. № 2. С. 273–279.
5. Ликсакова Н.С., Сорокина И.А. Редкие растительные сообщества на проектируемых для охраны территориях на востоке Ленинградской области // Ботанический журнал. 2017. Т. 102. № 2. С. 232–248.
6. Сорокина И.А., Степанчикова И.А., Гимельбрант Д.Е., Ликсакова Н.С., Спирин В.А., Кушневская Е.В., Гагарина Л.В., Ефимов П.Г. Краткие очерки трех планируемых ООПТ востока Ленинградской области // Ботанический журнал. 2017. Т. 102. № 9. С. 1270–1289.

## БИОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ, СОВРЕМЕННЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ НЕОНАТАЛЬНОГО СЕПСИСА

Керимова Н.Т.

*Азербайджанский медицинский университет, Баку, e-mail: etplaboratoriya@mail.ru*

В представленной научной статье изложены биологические действия и свойства антимикробных пептидов (АМП), дефензинов, эндотоксинов, обладающих антибактериальной, противовирусной и противовоспалительной активностью. Дефензины относятся к иммунозащитным пептидам и продуцируются иммунной системой, играя главную роль как молекулы-эффекторы врожденного иммунитета. Целью данного исследования было определение критериев развития сепсиса у новорожденных разного гестационного возраста на основе комплексного анализа биохимических и иммунологических данных. В статье представлены возможности использования данных АМП в диагностике и лечении патологических состояний, в том числе при сепсисе. Были определены критерии диагностики у новорожденных детей с сепсисом по уровню цитокинов в сыворотке крови. Определение было проведено стандартным методом твердофазового («сэндвич» вариант) иммуноферментного анализа на автоматическом анализаторе «ElisysUno» (Германия). Были обследованы 50 новорожденных детей с сепсисом, 17 из которых доношенные, 33 недоношенные, и 30 здоровых новорожденных – контрольная группа. Полученные данные были подвергнуты статистической обработке с вычислением U-критерия Уилкоксона (Манна – Уитни). Установлено статистически значимое изменение концентрации указанных показателей в сыворотке крови и возможности их использования в своевременной диагностике и определении тяжести поражения септических детей. Выявлена зависимость между показателями АМП, дефензинов, эндотоксинов, провоспалительных (ИЛ-6, ИЛ-8) цитокинов в сыворотке крови и клиническими проявлениями инфекции. Помимо этого повышение уровней билирубина, АСАТ, АЛАТ является показателем ухудшения состояния и неблагоприятным прогнозом у новорожденных детей с сепсисом. Изменения этих показателей дают возможность прогнозировать течение воспалительного процесса у новорожденных детей при данной патологии. Результаты исследования дают основание утверждать, что изменения иммунологических и биохимических показателей и содержания АМП у доношенных и недоношенных детей с сепсисом позволяют использовать их как дополнительные критерии для характеристики воспалительного процесса при сепсисе, прогноза исходов и оценки степени иммунодефицита.

**Ключевые слова:** доношенные и недоношенные новорожденные, сепсис, антимикробные пептиды, дефензины, эндотоксины, провоспалительные цитокины, интерлейкин-6, интерлейкин-8

## BIOCHEMICAL FEATURES AS MODERN LABORATORY PROGNOSTIC CRITERIA FOR NEONATAL SEPSIS

Kerimova N.T.

*Department of biochemistry of Azerbaijan Medical University, Baku, e-mail: etplaboratoriya@mail.ru*

The presented scientific article describes the biological actions and properties of antimicrobial peptides (AMP), defensins, endotoxins, which have antibacterial, antiviral and anti-inflammatory activity. Defensins are immunoprotective peptides and are produced by the immune system, they play a major role as innate immune effector molecules. The aim of this study was to determine the criteria for the development of sepsis in newborns of different gestational ages based on a comprehensive analysis of biochemical and immunological data. The article presents the possibilities of using AMP data in the diagnosis and treatment of sepsis. The criteria for diagnostics in newborns with sepsis were determined by the level of cytokines in the blood serum. The determination was carried out by the standard method of solid-phase (“sandwich” version) enzyme-linked immunosorbent assay on an automatic analyzer “ElisysUno” (Germany). We studied 50 newborns with sepsis, 17 of which were full-term, 33 premature, and 30 healthy newborns – the control group. The data obtained were subjected to statistical processing with the calculation of the Wilcoxon U-test (Mann-Whitney). A statistically significant change in the concentration of these indicators in the blood serum and the possibility of their use in timely diagnosis and determination of the severity of lesions in septic children were established. A relationship was revealed between the parameters of AMP, defensins, endotoxins, pro-inflammatory (IL-6, IL-8) cytokines in the blood serum and clinical manifestations of infection. In addition, an increase in the levels of bilirubin, ASAT, ALAT is an indicator of the deterioration of the condition and a poor prognosis in newborns with sepsis. Changes in these indicators make it possible to predict the course of the inflammatory process in newborns with sepsis. The results of the study suggest that changes in immunological and biochemical parameters and AMP content in term and premature infants with sepsis make it possible to use them as additional criteria for characterizing the inflammatory process in sepsis, predicting outcomes and assessing the degree of immunodeficiency.

**Keywords:** full-term and premature infants, sepsis, antimicrobial peptides, defensins, endotoxins, pro-inflammatory cytokines, interleukin-6, interleukin-8

Сепсис – одна из наиболее сложных и до конца не изученных проблем здравоохранения. Тяжелое течение сепсиса и септический шок, встречающиеся согласно

статистике, примерно в 2/3 всех случаев заболевания, все еще остаются наиболее частыми причинами смерти пациентов в отделениях интенсивной терапии. Несмотря

на создание новых, эффективных методов борьбы с сепсисом, ежегодно во всем мире регистрируется более 18 млн случаев заболевания, летальность же колеблется на уровне 50–80% [1, 2].

Наибольшая заболеваемость сепсисом среди всех возрастных групп наблюдается у новорожденных и составляет около 3 млн детей во всем мире (22 на 1000 живорождений) со смертностью 11–19% и выраженными многочисленными долговременными неврологическими нарушениями [3, 4]. У новорожденных с повышением температуры тела в течение более 1 часа, не вызванным экологическими причинами и превышающим 39°C, чаще встречаются бактериемия, менингит, пневмония, а также патологии, связанные с вирусными заболеваниями, в частности герпес-симплексным энцефалитом [5]. Респираторное расстройство, включая тахипноэ, хрюканье, расширение носа и ретракцию дыхательных мышц, может быть единственным проявлением сепсиса с пневмонией или без нее и может быть изначально спутано с переходящим тахипноэ у новорожденного. У новорожденных с сепсисом быстрое клиническое ухудшение наступает, если не начато своевременное управление антибиотиками. Сепсис новорожденных может осложняться метастатическими очагами инфекции, диссеминированным внутрисосудистым свертыванием, застойной сердечной недостаточностью и шоком [6]. Эндогенные антимикробные пептиды (АМП) играют важную роль в регулировании адаптивной иммунной системы, а также в развитии процессов воспаления [7]. Врожденная иммунная система, защищая организм от инфекций, активирует адаптивный иммунитет. Противомикробные пептиды являются неспецифическими факторами гуморального иммунитета, обладают иммуномодулирующей и нейтрализующей активностью эндотоксина, а также обеспечивают защиту организма от различных микроорганизмов, включая бактерии, вирусы и грибы. Основная функция эндогенных антимикробных пептидов – это поддержание приобретённого иммунитета [8, 9].

Дефензины выступают в роли активных хемоаттрактантов для клеток иммунной системы, увеличивая синтез цитокинов. Так,  $\alpha$ -дефензины за счет IFN $\alpha$ , ИЛ-10 и ИЛ-6 в условиях *in vitro* способны повысить адгезию Т-лимфоцитов к эпителиоцитам легких [6, 10], а HNP-1, активируя гены синтеза некоторых хемокинов, может опосредованно выступать в роли хемоаттрактанта для моноцитов [6]. Хемотаксическое действие дефензинов проявля-

ется при очень низких их уровнях, что значительно меньше концентраций, требуемых для уничтожения микробов [2, 3, 11].

Дефензины, будучи иммунопротекторными пептидами, обладают широким спектром биологических свойств, от прямой способности уничтожения патологического агента до модуляции иммунных ответов и регулирования воспалительного процесса [10]. При воспалительных процессах активация нейтрофилов приводит к скоростному высвобождению альфа-дефензинов. Это приводит к повышению их концентрации в плазме крови, что создает проблему в предотвращении цитопатического действия по отношению к собственным клеткам [12]. В условиях патологии, в частности при сепсисе, концентрация альфа-дефензинов значительно увеличивается. Помимо этого, немаловажна роль альфа-дефензинов в защите от таких инфекций, как ВИЧ и летальная легочная патология в результате адаптированного к мышши штамма SARS-коронавируса [13, 14].

Имеется закономерность в реакции организма на грамотрицательные бактерии, отличающаяся от аналогичных ответных реакций при грамположительной инфекции. Так, в первом случае наблюдается повышение продукции некоторых цитокинов: фактора некроза опухоли (TNF- $\beta$ ), интерлейкина-1 (ИЛ-1), интерлейкина-6 (ИЛ-6), что, соответственно, приводит к дисбалансу про- и противовоспалительных цитокинов, являясь патогенетической основой септического шока и полиорганной недостаточности, а нередко и ДВС-синдрома [15].

При неонатальном сепсисе количество цитокинов в крови резко увеличивается. Это происходит еще до увеличения белков острой фазы. Количество некоторых цитокинов (ИЛ-1 $\beta$ , ИЛ-6, ИЛ-8, TNF- $\alpha$ ) увеличивается быстрее у новорожденных в ответ на бактериальную инфекцию. Это увеличение можно наблюдать еще до появления признаков и симптомов сепсиса у новорожденных. Поскольку цитокины не проникают через плацентарный барьер, увеличение этих цитокинов наблюдается в образцах крови, взятых из пуповины. Это позволяет судить о возможности развития сепсиса у новорожденных в первые часы жизни, а также прогнозировать последующее течение сепсиса. Из них более информативными считаются ИЛ-6 и ИЛ-8. Количество интерлейкина-6 выше при раннем сепсисе. ИЛ-8 – это провоспалительный цитокин, который ускоряет активацию нейтрофилов и хемотаксис. ИЛ-8 является не только маркером сепсиса, но и индикатором степени тяжести инфекции [15–17].

Целью исследования явилось определение критериев развития сепсиса у новорожденных различного гестационного возраста на основе комплексного анализа клинико-анамнестических, биохимических и иммунологических данных.

### Материалы и методы исследования

Исследования проводились в научно-исследовательской лаборатории НИИ Педиатрии им. К.Я. Фараджевой, г. Баку. Работа выполнена в отделениях патологии новорожденных, анестезиологии, интенсивной терапии и реанимации. Была исследована кровь 80 новорожденных (50 – с сепсисом, 30 – здоровых). По гестационному возрасту (ГВ) все новорожденные дети были разделены на 2 группы:

В I группу входило 17 новорожденных детей (ГВ 38–41 неделя);

Во II группу входило 33 новорожденных (ГВ 27–37 недель).

Контрольную группу составляли 30 здоровых новорожденных детей, родившихся в родильном доме № 7 г. Баку.

Среди инфицированных новорожденных I группы средний срок гестации составил  $37,8 \pm 0,2$  недель, II группы –  $32,8 \pm 0,5$  недель. В группе наблюдавшихся доношенных новорожденных детей средняя масса тела при рождении была  $3181 \pm 107,9$  г, у недоношенных этот показатель был равен  $1983,6 \pm 91,5$  г.

Биохимическая оценка проводилась путем изучения маркеров общего, прямого и непрямого билирубина по методу Ендрашика; АЛАТ, АСАТ – по методике Рейтмана-Френкеля – с использованием наборов фирмы «HUMAN» (Германия). Определение концентрации АМФ проводили методом иммуноферментного анализа (ИФА) по принципу «сэндвича» – иммуноферментным методом.

Определение концентрации АМФ проводилось методом иммуноферментного анализа (ELISA) по принципу «сэндвич» – на иммуноферментном анализаторе «ElisysUno» производства Германии. Были использованы наборы DEF-a1 фирмы «USCN» (KHP), Endotoxin (ET) ELISA Kit фирмы «abbexa». Статистическую обработку полученных результатов проводили с помощью определения U-критерия Уилкоксона (Манна – Уитни).

### Результаты исследования и их обсуждение

Активность патологического процесса в печени в целом влияла на изменения плазменных уровней изучаемых показателей антимикробных пептидов. Эти изменения были более характерны для новорожденных детей с неонатальным сепсисом. Повышение уровней билирубина, прямого билирубина, непрямого билирубина, а также АСАТ и АЛАТ у доношенных и недоношенных новорожденных детей в I и II группах по сравнению с контрольной группой является маркером неблагоприятного прогноза (табл. 1).

При исследовании I группы общий билирубин составлял  $154,4 \pm 25,3$  мкмоль/л при норме 2,0–17,1 мкмоль/л, прямой билирубин  $23,6 \pm 3,8$  мкмоль/л при норме 2,0–0,42 мкмоль/л, непрямого билирубин  $131,6 \pm 24,3$  мкмоль/л при норме 2,0–17,1 мкмоль/л, АЛАТ –  $95,0 \pm 35,1$  МЕ/мл при норме 10–45 МЕ/мл, АСАТ –  $109,5 \pm 45,2$  МЕ/мл при норме 10–38 МЕ/мл. II группе общий билирубин составлял  $150,6 \pm 12,5$  мкмоль/л, прямой билирубин  $22,3 \pm 3,0$ , непрямого билирубин  $131,1 \pm 11,2$  мкмоль/л, АЛАТ –  $51,0 \pm 10,1$  МЕ/мл, АСАТ –  $59,8 \pm 13,9$  МЕ/мл.

Таблица 1

Биохимические данные новорожденных детей с сепсисом в сравнении контрольной группой

Показатели	Нормальная величина	I группа (n = 17) доношенные	II группа (n = 33) недоношенные	p1
Общий билирубин, мкмоль/л	2,0–17,1	$154,4 \pm 25,3$ (52–432)	$150,6 \pm 12,5$ (62–320)	0,546
Прямой билирубин, мкмоль/л	2,0–0,42	$23,6 \pm 3,8$ (10–50)	$22,3 \pm 3,0$ (10–72)	0,652
Непрямой билирубин, мкмоль/л	2,0–17,1	$131,6 \pm 24,3$ (34–90)	$131,1 \pm 11,2$ (50–280)	0,346
АЛАТ, МЕ/мл	10–45	$95,0 \pm 35,1$ (21–300)	$51,0 \pm 10,1$ (28–118)	0,202
АСАТ, МЕ/мл	10–38	$109,5 \pm 45,2$ (28–380)	$59,8 \pm 13,9$ (30–160)	0,135

Примечание. p1 – статистическая значимость различий между показателями I и II групп. Результаты представлены в виде  $M \pm m.M$  – среднее значение, m – стандартная ошибка (min-max) – размах вариации: минимальное и максимальное значения ряда.



Таблица 2

Показатели АМП (дефензинов, эндотоксинов, ИЛ-6, ИЛ-8)  
у новорожденных детей с сепсисом

Параметры	Доношенные		p	Недоношенные		p	p1
	Контрольная группа (n = 23)	I группа (n = 17)		Контрольная группа (n = 7)	II группа (n = 33)		
Дефензины, нг/мл	48,4 ± 1,3 (31,2–58,4)	806,6 ± 58,6 (397,2–1098)	< 0,001	41,9 ± 4,2 (25,8–58,4)	740,3 ± 40,1 (401,8–1076)	< 0,001	0,771
Эндотоксин, МЕ/мл	0,410 ± 0,018 (0,27–0,57)	1,541 ± 0,039 (1,24–1,77)	< 0,001	0,337 ± 0,019 (0,25–0,39)	1,554 ± 0,017 (1,36–1,73)	< 0,001	0,157
ИЛ-6 pq/ml	3,3 ± 0,2 (1,7 ± 5,6)	51,7 ± 5,3 (11,2 ± 77,2)	< 0,001	3,1 ± 0,3 (3,8 ± 2,1)	50,7 ± 3,2 (16,8 ± 74,3)	< 0,001	0,673
ИЛ-8 pq/ml	11,8 ± 0,37 (6,7 ± 15,1)	347,6 ± 9,0 (236,3 ± 398,4)	< 0,001	12,3 ± 0,4 (13,4 ± 10,8)	313, ± 11,4 (134–396,1)	< 0,001	0,202

Примечание. Статистическая значимость различий:  
p – с показателями соответствующей контрольной группы;  
p1 – между показателями основных групп.

В табл. 2 представлены показатели АМП у новорожденных с сепсисом.

При исследовании было выявлено, что количество эндотоксина в I группе было повышено в 3,7 раза (1,541 ± 0,039) МЕ/мл, при контроле 0,410 ± 0,018 МЕ/мл, а во II группе в 4,6 раза (1,554 ± 0,017) МЕ/мл, при контроле 0,337 ± 0,019 МЕ/мл. Бактериальный эндотоксин, будучи постоянным структурным компонентом наружной клеточной стенки грамотрицательных бактерий, освобождается при их разрушении. Повышение количества дефензина отражает степень активации нейтрофилов (табл. 2).

Уровень дефензинов в сыворотке крови в I группе увеличивается в 16,6 раза (806,6 ± 58,6 нг/мл) при контроле 48,4 ± 1,3 нг/мл, а во II группе – в 17,6 (740,3 ± 40,1 нг/мл) при контроле 41,9 ± 4,2 нг/мл.

Полученные данные свидетельствуют о значительных изменениях концентраций дефензинов в крови новорожденных с сепсисом, что объясняется их иммунопротекторными свойствами на фоне воспалительной реакции организма, что позволяет дефензинам выступать в роли прогностического маркера.

При анализе активности воспалительного процесса у доношенных и недоношенных новорожденных детей с диагнозом «Сепсис» мы изучали также содержание цитокинов: интерлейкина ИЛ-6, ИЛ-8.

Количество интерлейкина-6 в I группе составляло 51,7 ± 5,3 pq/ml, увеличиваясь в 17,4 раза при сравнении с контрольной группой (3,3 ± 0,2 pq/ml), а во II группе – 50,7 ± 3,2 pq/ml, что в 1,06 раза выше, чем в контрольной группе (3,1 ± 0,3pq/ml).

Количество интерлейкина-8 в I группе составляло (347,6 ± 9,0 pq/ml) увеличиваясь в сравнении с контрольной группой в 21,8 раза (11,8 ± 0,37 pq/ml), а во II группе – в 10,8 раза (313, ± 11,4 pq/ml) при контроле 12,3 ± 0,4 pq/ml. Повышение уровня интерлейкинов является закономерной реакцией иммунной системы, причем возникновение данных изменений часто происходит раньше клинических проявлений, что свидетельствует о дисбалансе системы цитокинов на ранних стадиях септического процесса.

### Заключение

Количественное определение дефензинов может служить в качестве дополнительного маркера воспаления при сепсисе, что позволяет усовершенствовать диагностику и добиться прогресса в своевременном решении вопроса о проведении и правильном подборе терапии.

Комплексная оценка биохимических данных (билирубин, АСАТ, АЛАТ) вместе с изменениями показателей иммунного состояния и количества антимикробных пептидов у доношенных и недоношенных детей с сепсисом может использоваться в качестве критериев, характеризующих воспалительный процесс при сепсисе, а также помочь спрогнозировать результат и оценить степень иммунодефицитного состояния.

При оценке прогностической и диагностической значимости различных цитокинов и медиаторов иммунного ответа важен комплексный подход к определению иммунного статуса больного. Одновременное определение ИЛ-6 и ИЛ-8 позволяет судить

об иммунореактивности пациентов, так как эти цитокины сигнализируют об опасности раньше, чем клинические симптомы развития инфекционного осложнения становятся явными.

#### Список литературы

1. Antonopoulou A., Giamarellos-Bourboulis E.J. Immunomodulation in sepsis: state of the art and future perspective. *Immunotherapy*. 2011. Vol. 3. No. 1. P. 117–128.
2. Хаертынов Х.С., Анохин В.А., Мустафин И.Г. и др. Особенности иммунитета у новорожденных детей с локализованными и генерализованными формами бактериальных инфекций // *Российский вестник перинатологии и педиатрии*. 2015. № 5. С. 168–173.
3. Флейшманн С., Шераг А., Адхикари Н.К. и др. Оценка глобальной заболеваемости и смертности от госпитализированного сепсиса. Текущие оценки и ограничения. *Am J Respir Crit Care Med*. 2016. Vol. 193 (3). P. 259–72.
4. Нашкевич Н.Н. Альфа-дефензины – мультифункциональные молекулы нейтрофилов: роль в воспалении и инфекционной патологии человека // *Современные проблемы инфекционной патологии человека, сборник научных трудов, вып. 6*. Министерство здравоохранения Республики Беларусь, Республиканский научно-практический центр эпидемиологии и микробиологии. Минск, 2013. С. 221–226.
5. Wafaisade A., Lefering R., Bouillon B. et al. Epidemiology and Risk Factors of Sepsis after Multiple Trauma. An Analysis of 29, 829 Patients from the Trauma Registry of the German Society for Trauma Surgery. *Crit. Care Med*. 2011. Vol. 39 (4). P. 621–628.
6. Umasuthan N., Mothishri M.S., Thulasitha W.S., Nam B.H., Lee J. Molecular, genomic, and expressional delineation of a piscidin from rock bream (*Oplegnathus fasciatus*) with evidence for the potent antimicrobial activities of Of-Pis1 peptide. *Fish Shellfish Immunol*. 2016. Vol. 48. P. 154–168.
7. Гришин Д.В., Соколов Н.Н. Дефензины – естественные пептидные антибиотики высших эукариот // *Биомедицинская химия*. 2014. Т. 60. № 4. С. 438–447.
8. Gürsoy M., Gürsoy U.K., Liukkonen A., Kauko T., Penkala S., Könönen E. Salivary antimicrobial defensins in pregnancy. *J Clin Periodontol*. 2016. Oct. Vol. 43. No. 10. P. 807–815.
9. Азимова В.Т., Потатуркина-Нестерова Н.И., Нестеров А.С. Эндогенные антимикробные пептиды человека // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1–1. [Электронный ресурс]. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=17746> (дата обращения: 03.07.2021).
10. Опарина О.Н. Роль эндотоксина грамотрицательных бактерий кишечника в физиологических и патологических проявлениях стресса // *Современные научные исследования и инновации*. 2014. № 5. [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2014/05/32845> (дата обращения: 03.07.2021).
11. Yamaguchi Y., Ouchi Y. Antimicrobial peptide defensin: identification of novel isoforms and the characterization of their physiological roles and their significance in the pathogenesis of diseases. *Proceedings of the Japan Academy Series B, Physical and biological sciences*. 2012. Vol. 88(4). P. 152–166.
12. Bedi T., Mahendra J., Ambalavanan N. Defensins in periodontal health. *Indian J Dent Res*. 2015. Jul-Aug. Vol. 26. Issue 4. P. 340–344.
13. Nakatsuji T., Gallo R.L. Antimicrobial peptides: Old molecules with new ideas. *J. Invest. Dermatol*. 2012. Vol. 132. P. 887–895. [CrossRef].
14. Мирошниченко Ю.А., Шестопалов А.В., Смольянинова Л.П. Роль факторов врожденного иммунитета слизистой оболочки репродуктивного тракта // *Журнал фундаментальной медицины и биологии*. 2013. № 1. С. 11–15.
15. Гусев Е.Ю., Зотова Н.В., Лазарева М.А. Цитокиновый ответ и другие отличительные особенности критических фаз системного воспаления при сепсисе // *Медицинская иммунология*. 2014. Vol. 16 (2). P. 173–182. DOI: [org/10.15789/1563-0625-2014-2-173-182](https://doi.org/10.15789/1563-0625-2014-2-173-182).
16. Рябкова Н.Л., Везикова Н.Н. Эволюция лабораторных маркеров системных бактериальных инфекций // *Терапевтический архив*. 2017. Т. 89. № 11. С. 105–110. DOI: [10.17116/terarkh20178911105-110](https://doi.org/10.17116/terarkh20178911105-110).
17. Любимова М.А., Дунаева Е.В., Беляева Н.А. Течение раннего неонатального периода у новорожденных детей от матерей с гнойно-воспалительными изменениями в плаценте // *Бюллетень медицинских интернет-конференций*. 2014. № 4. С. 320–321.

УДК 574.632:551.464.679(282.247.345)

## СОДЕРЖАНИЕ $^{239+240}\text{Pu}$ В КОМПОНЕНТАХ ЭКОСИСТЕМЫ РЕКИ ЧЕРНОЙ И ОЦЕНКА ЕГО ВЫНОСА В СЕВАСТОПОЛЬСКУЮ БУХТУ

Параскив А.А., Проскурнин В.Ю., Малахова Л.В.

*Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, Севастополь,*

*e-mail: paraskiv@ibss-ras.ru*

Впервые определено содержание  $^{239+240}\text{Pu}$  в воде, гидробионтах и донных отложениях реки Черной. Концентрация  $^{239+240}\text{Pu}$  в воде устьевое участка реки составила  $2,82 \pm 0,23$  и  $3,8 \pm 0,31$  мБк/м<sup>3</sup> в зимний и летний сезоны соответственно и была выше таковой в среднем течении реки в 2 и 6 раз соответственно. Расчетным методом определена объемная активность  $^{239+240}\text{Pu}$  во взвешенной форме в воде устьевое района реки, которая составляла 0,73 мБк/м<sup>3</sup> и 1,56 мБк/м<sup>3</sup> в зимний и летний периоды года, что составило от 26 до 41 % от суммарной активности  $^{239+240}\text{Pu}$  соответственно. В воде реки содержание  $^{239+240}\text{Pu}$  не превысило нормы радиационной безопасности РФ. В двух районах реки определены коэффициенты накопления  $^{239+240}\text{Pu}$  гидрорастениями и моллюсками. Наибольшие коэффициенты накопления  $^{239+240}\text{Pu}$ , достигающие величин  $n \times 10^3$ , определены у водного растения поручейника *Sium sisaroides* (DC, 1830). Во всех точках отбора донных отложений удельная активность  $^{239+240}\text{Pu}$  была практически одинаковой. Отношение радиоизотопов  $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ , свидетельствует о едином источнике поступления плутония в исследуемых районах, как в воде, так и в грунтах – глобальных радиоактивных выпадениях. Проведена оценка выноса  $^{239+240}\text{Pu}$  в Севастопольскую бухту с потоком реки Черной. Показано, что практически весь плутоний, попадающий в Севастопольскую бухту с водами реки Черной, перераспределяется в ее донные отложения.

**Ключевые слова:**  $^{239+240}\text{Pu}$ , вода, гидробионты, донные отложения, река Черная, Севастопольская бухта, Крым

## THE CONTENT OF $^{239+240}\text{Pu}$ IN ECOSYSTEM COMPONENTS OF THE CHERNAYA RIVER AND ITS INFLUX TO THE SEVASTOPOL BAY

Paraskiv A.A., Proskurnin V.Yu., Malakhova L.V.

*A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Sea of RAS, Sevastopol,*

*e-mail: paraskiv@ibss-ras.ru*

The content of  $^{239+240}\text{Pu}$  in water, hydrobionts and bottom sediments of the Chernaya River was determined for the first time.  $^{239+240}\text{Pu}$  activity concentration in water of the river mouth area was  $2.82 \pm 0.23$  and  $3.8 \pm 0.31$  mBq/m<sup>3</sup> in the winter and summer seasons, respectively, and it was 2 and 6 times higher than that in the river middle course area.  $^{239+240}\text{Pu}$  activity concentration in suspended form in water of the river mouth area was calculated: 0.73 and 1.56 mBq/m<sup>3</sup> in the winter and summer seasons, which amounted from 26 to 41 % of the total  $^{239+240}\text{Pu}$  activity respectively. The content of  $^{239+240}\text{Pu}$  in the river water did not exceed the Russian Federation radiation safety standards.  $^{239+240}\text{Pu}$  concentration factors for hydrophytes and mollusks were determined in two river areas. The highest  $^{239+240}\text{Pu}$  concentration factors, reaching values of  $n \times 10^3$ , were found for aquatic plant *S. sisaroides*.  $^{239+240}\text{Pu}$  activity concentration at all bottom sediments sampling stations was almost the same.  $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$  activity ratio indicates the same source of plutonium input to the studied areas, both for water and for bottom sediments – global radioactive fallout.  $^{239+240}\text{Pu}$  influx from the Chernaya River to the Sevastopol Bay was estimated. It was shown that almost all plutonium entering the Sevastopol Bay with the Chernaya River waters is redistributed into its bottom sediments.

**Keywords:**  $^{239+240}\text{Pu}$ , water, hydrobionts, bottom sediments, Chernaya River, Sevastopol Bay, Crimea

Появление техногенных радиоизотопов плутония на Земле в середине XX в. связано с использованием их человеком в военных и мирных целях. Радиоизотопы плутония  $^{239+240}\text{Pu}$  являются альфа-излучающими изотопами, альфа-частицы которых обладают высокой энергией (5,15–5,16 МэВ), вследствие чего эти изотопы обладают значительной радиотоксичностью, а их длительные периоды полураспада обуславливают тот факт, что, попадая в природные водоемы, они накапливаются в их компонентах, включаясь в биогеохимические циклы. Источниками поступления плутония в окружающую среду являлись испытания ядерного оружия (92 %), промышленная переработка отработавшего ядерного топлива (7 %), радиационные аварии и бортовые источники

энергии сгоревших космических аппаратов. После испытаний ядерного оружия плутоний выпадал на поверхность земли и океана в виде аэрозольных и дождевых осадков. Высокие сорбционные свойства плутония ограничивают миграционную способность этих радионуклидов, в воде пресноводных водоемов более 90 % плутония находится во взвешенной форме. Большую роль в поступлении радионуклидов в речную воду играет загрязнение из водосборного бассейна в периоды весенних паводков и летних и осенних сезонов дождей за счет выщелачивания изотопов и эрозии почвы [1]. Ремобилизация плутония из почв сельскохозяйственных районов оценивалась в 0,05 % запасов на водосборе в год и 0,005 % – для дренажа почвенного покрова лесов, время нахождения

ния плутония на водосборных территориях варьировалось от  $10^3$  до  $2 \cdot 10^4$  лет. Имеются данные, что в воде р. Рона на юго-западе Франции, куда попадали стоки завода по переработке отработанного ядерного топлива в г. Маркуль, содержание большинства антропогенных радионуклидов за два последних десятилетия снизилось, при этом уровни именно трансурановых радионуклидов отмечались выше, чем в сопредельных речных экосистемах, не имеющих дополнительных источников их поступления [2]. Для полуострова Крым основными источниками поступления радиоизотопов плутония являются глобальные радиоактивные выпадения после испытаний ядерного оружия в открытых средах, а также авария на Чернобыльской АЭС [3].

Река Черная, являющаяся основным источником водоснабжения населения города Севастополя, относится к западной группе крымских рек, берет начало у подножья Крымской Яйлы, на высоте 280 м над уровнем моря. В месте выхода из гор средний годовой расход ее равен  $2,5 \text{ м}^3/\text{с}$ , далее он уменьшается, вследствие забора воды на орошение, вблизи устья составляет  $0,9 \text{ м}^3/\text{с}$ . В Байдарской долине сток реки и её притоков – малых рек, зарегулирован созданием больших и малых водохранилищ и прудов, как для орошения, так и для водоснабжения населенных пунктов. В центре долины на реке построено самое крупное

в Крыму водохранилище – Чернореченское, объемом  $64,2 \text{ млн м}^3$ . В пределах Байдарской долины река Черная принимает основные свои притоки, берущие начало на северных склонах Ай-Петринской яйлы. Река впадает в верховье Севастопольской бухты, при этом в зоне смешения речной и морской воды образуется естественный квазистационарный эстуарий [4].

Изучение содержания и распределения техногенных радионуклидов плутония в экосистеме реки Черной до настоящего времени не проводили. Этот вопрос представляет несомненный интерес, поскольку загрязненность окружающей среды антропогенными радионуклидами, в том числе изотопами плутония, в настоящее время является неустранимым явлением, учитывая уже поступившие объемы радиоактивных элементов в окружающую среду и новые поступления с функционирующими ядерных производств, АЭС и периодически случающихся ядерных инцидентов на Земле.

Целью работы являлось определение содержания  $^{239+240}\text{Pu}$  в компонентах экосистемы реки Черной и оценка его выноса в Севастопольскую бухту.

#### Материалы и методы исследования

Пробы воды, гидробионтов и донных отложений отбирали в феврале и июне 2020 г. Схема станций отбора проб приведена на рис. 1.

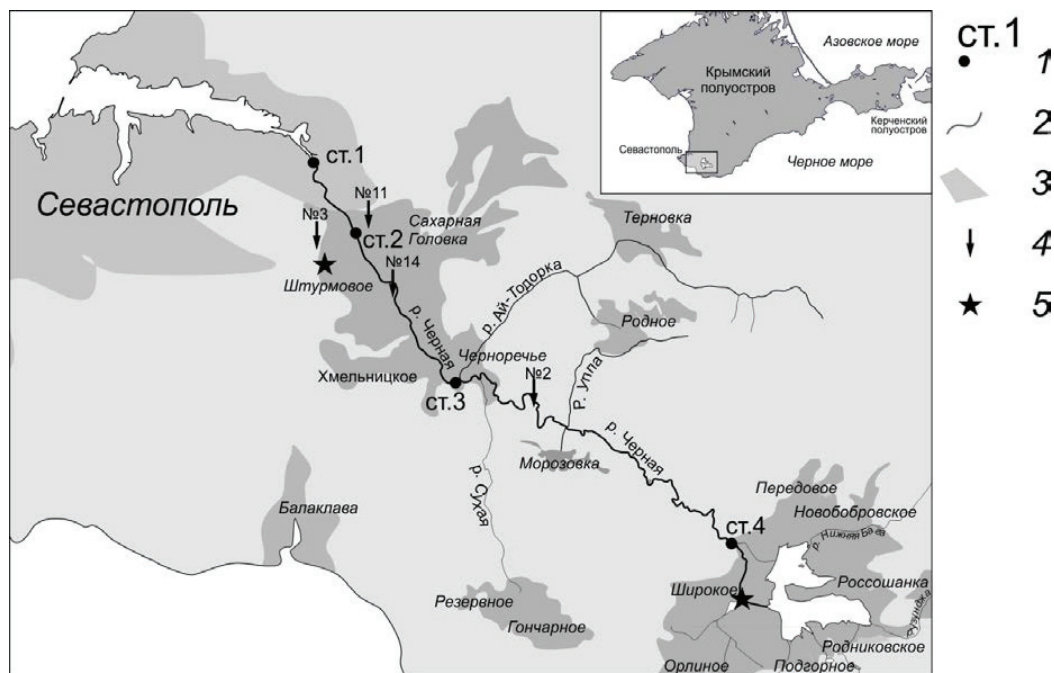


Рис. 1. Схема станций отбора проб на реке Черной.  
Обозначения: 1 – место отбора проб и номер станции, 2 – русло рек, 3 – контуры населенных пунктов, 4 – гидроузлы на реке Черной, 5 – очистные сооружения

Пробы воды объемом 1000 л отбирали в феврале и июне 2020 г. в трех точках нижнего и среднего течения реки Черной: в устьевой части в районе смешения речной и морской воды (ст. 1), у с. Хмельническое (ст. 3) и в Байдарской долине (ст. 4). Пробо-подготовка воды для определения объемной активности радионуклидов плутония включает этап его концентрирования из большого объема методом многократного соосаждения их с двумя видами сорбентов: трехкратного переосаждения с  $MnO_2$  и двукратного переосаждения с  $Fe(OH)_3$ , что позволяло сконцентрировать определяемые изотопы, уменьшив объем проб с 1000 л до 100–150 мл.

Для оценки уровня накопления  $^{239+240}Pu$  гидробионтами были отобраны пробы зеленой водоросли *Cladophora laetevirens* (Kütz-ling, 1843) и двустворчатых моллюсков – мидий *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) в устьевой части реки Черной на ст. 1. Для сравнительной оценки на ст. 3 были взяты пробы водного растения поручейника сизаровидного *Sium sisaroides* (DC, 1830), растущего в русле реки. Пробы водорослей, моллюсков и растений высушивали, озоляли в муфельной печи при  $550^\circ C$ , затем их гомогенизировали и отбирали аликвоты для анализа.

Пробы донных отложений (верхний 0–5 см слой) отбирали на ст. 1 в феврале 2020 г, на ст. 2–4 – в июне 2020 г. Пробы высушивали в сушильном шкафу, гомогенизировали, отбирали аликвоту для дальнейшего анализа и озоляли в муфельной печи при  $500^\circ C$ .

Озоленные пробы биоты и донных отложений подвергались двукратному кислотному выщелачиванию на водяной бане, а затем, наряду со сконцентрированными пробами воды, двуступенчатой ионообменной очистке. Полученные элюаты проб осаждали на диски из нержавеющей стали методом электролиза, подготавливая таким образом счетные образцы для альфа-спектрометрии. Более подробно методика радиохимической подготовки описана в работе [3].

Счетные образцы измерялись на альфа-спектрометрическом комплексе фирмы «ORTEC» (США) в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН на базе Института геологии и минералогии СО РАН. Для оценки химического выхода плутония перед началом радиохимической подготовки во все пробы вносили определенное количество эталонного раствора  $^{242}Pu$  в качестве внутреннего стандарта. Результаты определения объемной активности  $^{239+240}Pu$  в пробах воды представлены в МБк/м<sup>3</sup>, удельной активности  $^{239+240}Pu$  в пробах гидробионтов – в МБк/кг сырого веса, а в пробах донных отложений – в МБк/кг сухого веса пробы.

Оценка выноса плутония с потоком реки Черной  $R_{^{239+240}Pu}$  в Севастопольскую бухту выполнена по формуле (1) в соответствии с руководством [5]:

$$R_{^{239+240}Pu} = C_{^{239+240}Pu} \cdot W, \quad (1)$$

где  $C_{^{239+240}Pu}$  – объемная активность радиоизотопов  $^{239+240}Pu$  (МБк/м<sup>3</sup>), определенная в 2020 г.;  $W$  – месячный или среднегодовой объем стока (м<sup>3</sup>) на основании расходов воды по гидропосту с. Хмельническое – р. Черная в 2020 г.

### Результаты исследования и их обсуждение

Химический состав реки Черной формируется под влиянием физико-географических и метеорологических условий западного склона Крымских гор и Байдарской долины, где протекает речной поток. Многолетние исследования показали, что вода реки является слабощелочной, гидрокарбонатно-кальциевой, общая минерализация изменяется от 0,3 до 0,5 г/л. Значения солёности воды на ст. 1 показали, что в этом районе происходило смешение речной и морской воды (табл. 1).

$^{239+240}Pu$  в воде реки Черной. Результаты анализа объемной активности  $^{239+240}Pu$  в воде реки Черная представлены в табл. 1.

Таблица 1

Объемная активность  $^{239+240}Pu$  в воде реки Черная в 2020 г.

№ станции	Дата отбора	Соленость, ‰	$^{239+240}Pu \pm \sigma$ , МБк/м <sup>3</sup>	$^{238}Pu \pm \sigma$ , МБк/м <sup>3</sup>	$^{238}Pu/^{239+240}Pu$
1	18.02.2020	12,3	$2,82 \pm 0,23$	$0,10 \pm 0,05$	$0,036 \pm 0,02$
4	19.02.2020	0	$1,3 \pm 0,22$	н.п.д.*	н.д.**
1	09.06.2020	15,4	$3,8 \pm 0,31$	$0,09 \pm 0,06$	$0,023 \pm 0,017$
3	10.06.2020	0	$0,64 \pm 0,1$	н.п.д.	н.д.

Обозначение: \* – ниже предела обнаружения, \*\* – нет данных.

Таблица 2

Уровни вмешательства по содержанию  $^{239+240}\text{Pu}$  в питьевой воде [6] и контрольные уровни содержания радионуклидов в морских водах [7] в сравнении с фактической объемной активностью в воде р. Черной

Уровень вмешательства, Бк/л	Контрольный уровень по радиационно-экологическому критерию, Бк/л	Контрольный уровень по экологическому критерию, Бк/л	Фактическая объемная активность, Бк/л
$5,5 \times 10^{-1}$	$6,13 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^0$	$0,64 - 3,8 \times 10^{-6}$

Таблица 3

Объемная активность  $^{239+240}\text{Pu}$  в воде реки Черная в сравнении с реками, которые в разной степени подвергались радиационному загрязнению

Река	Годы отбора	Объемная активность $^{239+240}\text{Pu}$ , мБк/м <sup>3</sup>	Источник
Теча	1990–1996	123–520	[8]
Рона	2011–2017	$1,2 \pm 0,8$	[2]
Висла	2002–2004	$2,22 \pm 0,4 - 10,33 \pm 1,69$	[9]
Черная	2020	$0,64 \pm 0,1 - 3,8 \pm 0,31$	настоящее исследование

Содержание радионуклидов в питьевой воде в Российской Федерации регламентируется величинами уровней вмешательства согласно Нормам радиационной безопасности [6], а контрольные уровни радионуклидов в воде – рекомендательным документом Росгидромета [7] (табл. 2). Последние разработаны для морских вод, однако мы можем руководствоваться ими, рассматривая ст. 1, так как соленость 12,3–15,4 ‰ свидетельствует о преобладании соленых морских вод в зоне впадения реки Черная в Севастопольскую бухту в момент отбора проб.

Исходя из данных, представленных в табл. 2, можно заключить, что в настоящее время объемная активность  $^{239+240}\text{Pu}$  в водах реки Черная находится на 4–6 порядков величины ниже всех нормативных значений, принятых в РФ.

Для определения источников поступления плутония в экосистему реки Черной определено изотопное отношение  $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ , которое отличается на порядок для каждого источника радиоактивного загрязнения: в глобальных выпадениях отношение активностей  $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$  равно 0,026–0,036, в чернобыльских – 0,4–0,5, так как относительное количество  $^{238}\text{Pu}$  в реакторном плутонии выше, чем в оружейном [3]. Из данных, приведенных в табл. 2, по отношению  $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$  можно судить о доле чернобыльских радионуклидов в общем их содержании в воде реки Черной на ст. 1, которая свидетельствует о глобальных выпадениях, как об основном источнике поступления плутония в акваторию реки.

Проведена сравнительная оценка содержания радиоизотопов плутония в воде реки Черной с водами реки Теча (РФ, Челябинская обл.), в воды которой в 1950-е гг. сбрасывались высокоактивные отходы, реки Рона (Франция), на которой расположены 5 АЭС, а также завод по переработке радиоактивных отходов, и реки Висла (Польша), основными источниками радиоактивного загрязнения которой, так же как и реки Черной, являлись атмосферные выпадения после испытаний ядерного оружия в открытых средах и авария на Чернобыльской АЭС (табл. 3).

Данные, представленные в табл. 3, свидетельствуют о том, что содержание  $^{239+240}\text{Pu}$  в водах реки Черной находится на уровне, характерном для рек, имеющих значительно большие водосборные бассейны (Рона и Висла). Однако значения объемной активности  $^{239+240}\text{Pu}$  в реке Черной на несколько порядков величин меньше таковых, наблюдавшихся в реке Теча спустя 40 лет после сброса в нее высокоактивных отходов.

$^{239+240}\text{Pu}$  в гидробионтах. В зеленой водоросли кладофоре удельная активность  $^{239+240}\text{Pu}$  на ст. 1 составляла  $0,88 \pm 0,01$ , в ручейнике на ст. 3 –  $0,64 \pm 0,08$  мБк/кг сырой массы.

Наряду с водорослями и растениями в качестве удобных биоиндикаторов уровней загрязненности использовали животных, в частности беспозвоночных – средиземноморских мидий. На ст. 1 в зоне смешения морских и речных вод удельная активность  $^{239+240}\text{Pu}$  в створках мидий составляла  $0,47 \pm 0,34$  мБк/кг сырой массы. Ранее было

показано, что в процентном отношении накопление плутония в мидиях составило 92,6% в створках и 7,4% – в мягких тканях [10]. Таким образом, большая часть накопленного плутония не мигрирует по трофической цепи, а депонируется в створках мидий и остается при их отмирании в донных осадках водоёма.

Для изученных видов биоты были рассчитаны значения коэффициентов накопления плутония как основного показателя, характеризующего аккумуляционную способность каждого вида в отношении рассматриваемых антропогенных радионуклидов (рис. 2). Значения коэффициентов накопления, представленные на рис. 2, свидетельствуют о том, что, несмотря на практически одинаковую удельную активность, поручейник обладает более высокой накопительной способностью в отношении плутония, чем зеленые водоросли и раковины мидий.

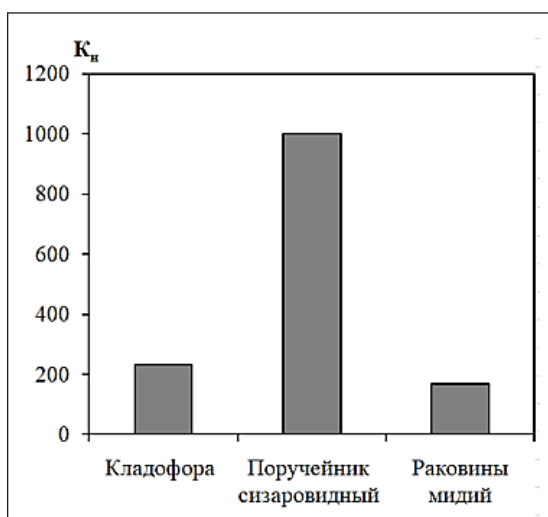


Рис. 2. Коэффициенты накопления  $^{239+240}\text{Pu}$  в гидробионтах реки Черной

$^{239+240}\text{Pu}$  в поверхностном слое донных отложений. Результаты определения удельной активности  $^{239+240}\text{Pu}$  в поверхностном

0–5 см слое донных отложений реки Черной представлены в табл. 4.

Из данных, представленных в табл. 4, видно, что удельная активность  $^{239+240}\text{Pu}$  в верхнем 0–5 см слое донных отложений практически одинакова на всех станциях отбора в реке Черная. Стоит отметить, что ранее было показано увеличение удельной активности плутония в 0–5 см слое донных отложений Севастопольской бухты, начиная от места впадения в нее реки Черной ( $276 \pm 53$  мБк/кг) до ее устьевой части ( $993 \pm 53$  мБк/кг) [11].

Известно, что в морских и пресноводных экосистемах плутоний проявляет ярко выраженные педотропные свойства, т.е. связывается со взвешенным веществом и накапливается в донных отложениях водоема [1, 3]. Это согласуется с полученными нами данными о более высоком содержании  $^{239+240}\text{Pu}$  в донных отложениях, чем в воде и биоте реки Черной. Так, донные отложения реки Черная обладают наибольшими коэффициентами накопления плутония ( $n \times 10^5$ ) по сравнению с гидробионтами.

Отношение активностей  $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$  в донных осадках изменялось от 0,076 на ст. 1 до 0,300 – на ст. 2. Такое существенное отличие может быть связано с пятнистостью чернобыльских выпадений. В целом отношение изотопов Pu показывает, что в донных отложениях, как и в воде, основным источником поступления плутония являлись глобальные выпадения.

Оценка выноса  $^{239+240}\text{Pu}$  со стоком реки Черной в Севастопольскую бухту. Сравнение водности реки в 2020 г. с многолетними данными с 1961 по 2007 г. показало, что 2020 г. являлся маловодным, средний годовой расход воды реки Черной в 2020 г. по данным Крым УГМС составил  $1,16 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Исходя из полученных значений объемной активности  $^{239+240}\text{Pu}$  в воде реки в 2020 г. на разных станциях отбора, рассчитали годовой сток плутония по формуле (1). Диапазон значений составил от 23 до 121 кБк/год.

Таблица 4

Удельная активность  $^{239+240}\text{Pu}$  в 0–5 см слое донных отложений реки Черной в 2020 г.

№ станции	Дата отбора	$^{239+240}\text{Pu} \pm \sigma, \text{ Бк/м}^3$	$^{238}\text{Pu} \pm \sigma, \text{ мБк/м}^3$	$^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$
1	18.02.2020	$206 \pm 13$	$16 \pm 6$	$0,076 \pm 0,030$
2	09.06.2020	$199 \pm 15$	$60 \pm 9$	$0,300 \pm 0,050$
3	09.06.2020	$199 \pm 24$	н.п.д.	н.д.
4	10.06.2020	$266 \pm 26$	$30 \pm 12$	$0,113 \pm 0,045$

Следует учесть, однако, что на ст. 1, в зоне впадения реки в бухту, во время пробоотбора наблюдалось преобладание морских вод, исходя из данных по определению солёности (табл. 1). Поэтому значение 121 кБк/год, рассчитанное по средней объемной активности  $^{239+240}\text{Pu}$  в феврале и июне, может давать завышенную оценку.

Как было сказано выше, радионуклиды плутония характеризуются большой сорбционной способностью и активно связываются со взвешенным веществом. Параллельно с отбором проб воды для определения  $^{239+240}\text{Pu}$  выполнялось определение количества общего взвешенного вещества в воде. Для ст. 1 в зимний период концентрация взвешенного вещества в воде составляла  $3,56 \text{ г/м}^3$ , а в летний –  $7,6 \text{ г/м}^3$ . Повышенное содержание взвешенного вещества в летний период может объяснять более высокие значения объемной активности  $^{239+240}\text{Pu}$  в этот период. Исходя из близких значений коэффициентов накопления плутония в донных отложениях и взвешенном веществе [12], можно принять, что удельная активность  $^{239+240}\text{Pu}$  во взвешенном веществе приблизительно равна его удельной активности в донных отложениях. При таком условии расчетное значение объемной активности  $^{239+240}\text{Pu}$  во взвешенной форме составляло  $0,73 \text{ МБк/м}^3$  и  $1,56 \text{ МБк/м}^3$  в зимний и летний периоды года соответственно. Таким образом, доля плутония во взвешенном веществе на ст. 1 находилась в диапазоне от 26 до 41 %.

Это обуславливает тот факт, что максимальное значение выноса  $^{239+240}\text{Pu}$  с водами реки Черной (121 кБк/год), вероятно, может быть меньше на 41 %. В целом условия, наблюдающиеся в зоне смешения речных и морских вод, носят сложный характер и требуют дополнительного изучения для понимания процессов перераспределения радионуклидов плутония в системе вода – взвешенное вещество – донные отложения в таких условиях.

Однако даже завышенная оценка среднегодового выноса  $^{239+240}\text{Pu}$  с водами реки Черная в Севастопольскую бухту, по всей видимости, вносит лишь небольшой вклад в содержание плутония в экосистеме бухты. Ранее рассчитанный седиментационный поток  $^{239+240}\text{Pu}$  в донные отложения Севастопольской бухты составил  $8,18 \text{ МБк/год}$  [13]. Если принять условие стационарности выноса  $^{239+240}\text{Pu}$  с потоком реки Черной, то в год он составит 1,48 % от годового седиментационного потока плутония в Севастопольской бухте. Такое соотношение показывает, что все количество плутония, поступающее со стоком реки, может быть депонировано в грунтах бухты за счет седиментацион-

ного потока. Факт незначительности потока выноса плутония с водами реки Черная подтверждается данными об увеличении удельной активности  $^{239+240}\text{Pu}$  в поверхностных донных отложениях в Севастопольской бухте от ее верховья к выходу в открытое море, упомянутый выше [11]. Наблюдавшееся увеличение, по-видимому, связано с «разбавлением» седиментационных потоков в зоне воздействия речных вод взвесями, обедненными плутонием по сравнению с потоками вещества, привносимыми в бухту из открытой части моря.

### Заключение

Впервые было проведено определение содержания  $^{239+240}\text{Pu}$  в воде, гидробионтах и донных отложениях реки Черной. В природе аналогов изучаемых радиоизотопов нет, они являются индикаторами техногенного загрязнения реки. Поскольку активных источников  $^{239+240}\text{Pu}$  на водосборной площади реки нет, то появление этих изотопов в компонентах экосистемы реки Черной является откликом экосистемы реки на загрязнение из отдаленных во времени и пространстве источников, к которым относятся глобальные радиоактивные выпадения после испытаний ядерного оружия и чернобыльская авария. По величине содержания  $^{239+240}\text{Pu}$  в воде и донных отложениях по сравнению со средним течением реки более техногенно нагруженной вода оказалась в устьевом участке. По отношению к уровням вмешательства для питьевой воды, установленным нормами радиационной безопасности РФ, в воде реки не отмечено превышения нормативных значений, что свидетельствует о высоком качестве воды одного из основных ресурсов питьевого водоснабжения г. Севастополя в отношении изучаемых радионуклидов. Однако даже такие невысокие концентрации  $^{239+240}\text{Pu}$  в воде приводят к заметному накоплению в гидробионтах, обитающих в экосистеме реки. В двух районах реки определены уровни накопления  $^{239+240}\text{Pu}$  водорослями, растениями и створками моллюсков. Наибольшие Кн плутония среди изученных представителей биоты, достигающие  $n \times 10^3$ , оказались у водного растения поручейника.

Наибольшие величины удельной активности  $^{239+240}\text{Pu}$  среди компонент экосистемы реки Черной определены в поверхностном 0–5 см слое донных отложений. При этом они были практически одинаковы на всех станциях отбора. Этот факт, а также отношение радионуклидов  $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ , свидетельствует о едином источнике плутония в исследуемых районах – глобальных радиоактивных выпадениях.



Определен вынос  $^{239+240}\text{Pu}$  в Севастопольскую бухту с потоком реки Черной. Показано, что весь плутоний, привносимый в бухту с речным стоком, может элиминироваться из водной массы бухты за счет седиментационных потоков.

*Работа выполнена в рамках темы НИР ФИЦ ИнБЮМ «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (1210315005-8) и регионального гранта РФФИ и города Севастополя 20-45-920004 р-а «Балансовое изучение влияния стока реки Черной на эвтрофикацию и загрязнение Севастопольской бухты антропогенными радионуклидами, тяжёлыми металлами и хлорорганическими ксенобиотиками».*

*Авторы благодарят Мильчакову Н.А. и Александрова В.В. за определение видов гидрорифтов, Сидорова И.Г. и Мосейченко И.Н. за помощь в отборе проб.*

#### Список литературы

1. Трапезникова В.Н., Трапезников А.В. Радиоэкология пресноводных экосистем как научная дисциплина // Вопросы радиационной безопасности. 2006. № 1. С. 35–58.
2. Eyrolle F., Lepage H., Antonelli C., Morereau A., Cossonnet C., Boyer P., Gurriaran R. Radionuclides in waters and suspended sediments in the Rhone River (France)-Current contents, anthropic pressures and trajectories. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 723. P. 137873.
3. Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н., Гулин С.Б., Стокозов Н.А., Лазоренко Г.Е., Мирзоева Н.Ю., Терещенко Н.Н., Цыгугина В.Г., Кулебакина Л.Г., Поповичев В.Н., Коротков А.А., Евтушенко Д.Б., Жерко Н.В., Малахова Л.В. Радиоэкологический отклик Чёрного моря на чернобыльскую аварию. Г.Г. Поликарпов, В.Н. Егоров – ред. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 667 с.
4. Овсяный Е.И., Орехова Н.А. Гидрохимический режим реки Черной (Крым): экологические аспекты // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34. № 1 (199). С. 82–94.
5. Временные методические рекомендации по расчету выноса органических, биогенных веществ, пестицидов и микроэлементов речным стоком. М.: Гидрометеоздат, 1983. 32 с.
6. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009).
7. Р52.18.852-2016 «Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в морских водах» Министрство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Роскомгидромет, Обнинск, 2016. 26 с.
8. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В., Николкин В.Н. Радиоэкологический мониторинг пресноводных экосистем, Т. I. Екатеринбург: Изд-во «АкадемНаука2», 2014. 496 с.
9. Bogdan S., Jahnz-Bielawska A., Strumińska-Parulska D.I. The inflow of  $^{238}\text{Pu}$  and  $^{239+240}\text{Pu}$  from the Vistula River catchment area to the Baltic Sea. *Journal of environmental radioactivity*. 2011. Vol. 102. Iss. 8. P. 728-734. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.03.017>.
10. Терещенко Н.Н. Плутоний в гидробионтах Чёрного моря // *Наукові праці: науково-методичний журнал. Техногенна безпека*. 2013. Т. 210. № 198. С. 52–60.
11. Терещенко Н.Н., Проскурнин В.Ю., Гулин С.Б., Крылова Т.А. Радиоэкологический мониторинг плутония в донных отложениях севастопольских бухт // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2013. Вып. 27. С. 289–293.
12. Proskurnin V.Yu., Tereshchenko N.N., Paraskiv A.A., Chuzhikova-Proskurnina O.D. Plutonium and americium in the deep Black Sea bottom sediments // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021. Vol. 229-230. Article no. 106540 (9 p.). DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106540.
13. Егоров В.Н., Гулин С.Б., Малахова Л.В., Мирзоева Н.Ю., Поповичев В.Н., Терещенко Н.Н., Лазоренко Г.Е., Плотичина О.В., Малахова Т.В., Проскурнин В.Ю., Сидоров И.Г., Стецок А.П., Гулина Л.В. Нормирование качества вод Севастопольской бухты по потокам депонирования загрязняющих веществ в донные отложения // *Водные ресурсы*. 2018. Т. 45. № 2. С. 188–195. DOI: 10.7868/S0321059618020086.

УДК 626.02:612.2:57.042

## ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ СТРАТЕГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА ВОДОЛАЗНЫХ ДЫХАТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

**Яхонтов Б.О.***Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: giper28@ocean.ru*

На основе экспериментальных данных обсуждаются физиологические аспекты стратегии формирования состава дыхательных газовых смесей (ДГС), которые направлены на оптимизацию функционального состояния организма под водой и в водолазных барокамерах. Как главные факторы дыхательной среды и их эффекты, на которые можно воздействовать с помощью ДГС, рассматриваются: плотность (повышение работы дыхания), кислород (гипоксия и интоксикация), инертные газы (азотный наркоз и НСВД). Эти факторы составляют физиологическую основу стратегии разработки ДГС, которая включает основные направления: снижение плотности ДГС путем замены относительно тяжелого инертного компонента смеси более легким, это снижает нагрузку на легочное дыхание, улучшает элиминацию  $\text{CO}_2$  из организма и поддерживает работоспособность; поддержание парциального давления кислорода в диапазоне допустимых величин во избежание развития кислородной недостаточности или токсичности при любых физиологических состояниях (покой, работа) и в любых условиях (под водой, барокамера), это поддерживает жизнедеятельность и работоспособность водолаза; ослабление азотного наркоза или его исключение путем ограничения глубины погружения с использованием кислородно-азотных смесей или замены азота в смеси на ненаркотичные газы при глубоководных погружениях; ослабление НСВД при глубоководных спусках путем использования азота в составе трехкомпонентной смеси и снижения скорости компрессии. Физиологические аспекты стратегии формирования ДГС относятся к любым смесям, предназначенным для дыхания под водой или в барокамерах, а также для декомпрессии, лечебной рекомпрессии, к «смесевым» аппаратам с замкнутым циклом дыхания типа «ребризер».

**Ключевые слова:** водолазные погружения, дыхательные смеси, водолазная барокамера, плотность газовой смеси, кислород, гиперкапния, азотный наркоз, работоспособность

## PHYSIOLOGICAL STRATEGY FOR THE FORMATION OF THE COMPOSITION OF DIVING BREATHING MIXTURES

**Yakhontov B.O.***Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: giper28@ocean.ru*

On the basis of experimental data, the physiological aspects of the strategy for the formation of the composition of breathing gas mixtures (BGM), which are aimed at optimizing the functional state of the body under water and in diving pressure chambers, are discussed. As the main factors of the respiratory environment and their effects, which can be influenced with the help of BGM, are considered: density (increase in the work of breathing), oxygen (hypoxia and intoxication), inert gases (nitrogen narcosis and NSHP). These factors constitute the physiological basis of the BGM development strategy, which includes the main directions: reducing the density of BGM by replacing a relatively heavy inert component of the mixture with a lighter one, this reduces the load on the pulmonary breathing, improves the elimination of  $\text{CO}_2$  from the body and maintains performance; maintaining the partial pressure of oxygen in the range of permissible values in order to avoid the development of oxygen deficiency or toxicity in any physiological conditions (rest, work) and in any environment (under water, pressure chamber), this supports the vital activity and work capacity of the diver; weakening nitrogen narcosis or its exclusion by limiting the depth of immersion using oxy-nitrogen mixtures or replacing nitrogen in the mixture with non-narcotic gases during deep-sea dives; attenuation of NSHP during deep-water descents by using nitrogen as part of a three-component mixture and reducing the compression rate. The physiological aspects of the strategy for the formation of BGM relate to any mixtures intended for breathing under water or in pressure chambers, as well as for decompression, therapeutic recompression, and "mixed" apparatuses with a closed breathing cycle of the "rebreather" type.

**Keywords:** diving descents, breathing mixtures, diving pressure chamber, gas mixture density, oxygen, hypercapnia, nitrogen narcosis, working capacity

Стратегия формирования состава дыхательных газовых смесей (ДГС) направлена на поддержание умственной и физической работоспособности водолаза, качественное решение поставленных производственных или научных задач под водой, безопасность и сохранение здоровья. При этом наибольшее значение имеют физиологические аспекты, от которых зависит функциональное состояние организма под водой и в водолазных барокамерах, управляемое посредством дыхательных газовых смесей.

Любые ДГС состоят из кислорода и инертных компонентов. Количественное соотношение этих газов в смесях зависит в основном от двух факторов, которые влияют на проявление их биологической активности – от рабочей глубины погружения и длительности пребывания и работы водолазов (акванавтов) в измененной гипербарической газовой среде. Поэтому принцип формирования состава ДГС сводится к нормированию кислорода и азота, так как в условиях повышенного давления кислород об-

ладает токсическим действием на организм водолаза при его избытке по парциальному давлению, азот – наркотическим [1]. Другие инертные газы, которые в настоящее время используются в водолазной практике (гелий) или в принципе могут использоваться (водород, неон) в составе водолазных ДГС, не проявляют наркотических свойств в диапазоне достигнутых человеком глубин, поэтому они включаются в состав ДГС как газы-разбавители (дилуэнты) кислорода и всегда занимают наибольшую долю в смеси.

Действие гипербарической среды на организм можно свести к действию нескольких физических и физиологических факторов, которые являются первичными источниками дискомфорта и опасностей, особенно на больших глубинах. Главные из них – плотность газовой среды (влияние на механику дыхания и дыхательный газообмен), кислород (кислородная недостаточность и интоксикация кислородом), биологическое действие инертных газов (гипербарический азотный наркоз и связанный с влиянием гелия нервный синдром высокого давления), обмен инертными газами между организмом и средой (компрессия и декомпрессия), теплообмен [2].

Все эти эффекты в равной степени относятся и к реальным спускам водолазов методом кратковременных погружений (КП) на глубину [3], и к насыщенным погружениям акванавтов в барокамерах методом длительного пребывания (ДП). В последнем случае большое значение имеет длительность и многократность воздействия этих факторов на организм, что может привести к перегрузке физиологических систем организма и неблагоприятным отдаленным последствиям [4].

Все водолазные дыхательные смеси направлены на поддержание оптимального дыхательного газообмена (потребление  $O_2$  и выделение  $CO_2$ ), работоспособности и приемлемого временного и безопасного режима компрессии и декомпрессии. Это возможно достичь в основном путем использования эффектов действия газов на организм и оптимизации их количественного соотношения в смеси, что и составляет физиологическую основу стратегии формирования состава дыхательных смесей. Кроме основных, используемых в водолазной практике инертных газов (азот и гелий), в состав ДГС могут включаться и более легкие и ненаркотичные газы – водород и неон. Водород имеет перспективу использования его на больших глубинах, но при решении проблемы пожаро-взрывобезопасности кислородно-водородных смесей и стоимо-

сти обеспечения погружений. Благородный газ неон в основном в связи с его высокой стоимостью в составе водолазных ДГС на практике не используется, другие, более тяжелые инертные газы, такие как аргон, криптон и ксенон, не перспективны для использования по причине их высокой плотности и наркотического действия [5]. Неон применялся в научных целях для имитации больших глубин по фактору плотности. В России были проведены исследования на имитированных в береговом водолажном комплексе глубинах до 400 м с использованием дыхательных смесей на основе неона [6]. В этих экспериментальных погружениях физиологические исследования проводились при плотностях дыхательной смеси до 32,5 г/л, что во много раз превосходит плотность воздуха при нормальном давлении. Высокая плотность среды ограничивала возможности пребывания человека и выполнения физической работы в таких условиях. Эффект плотности до 20 г/л проявлялся в умеренном изменении биомеханики дыхания, газообмена, снижении показателей вентиляторной функции легких и физической работоспособности [7]. В исследованиях на животных (морские свинки) было показано [8], что гипоксия мозга появляется при очень высокой гипербарической плотности (77 г/л) кислородно-неоновой смеси с нормальным парциальным давлением кислорода ( $PO_2$ ). Это многократно превышает плотность смеси без неона, при которой развивается гипоксия мозга. Важно, что это преимущество неона наблюдалось при большом повышении мозгового кровотока и уровня  $PO_2$  в структурах головного мозга.

Все газы, которые могут использоваться для приготовления дыхательных смесей, обладают разными физическими свойствами, поэтому в различных количественных соотношениях они изменяют физические свойства смеси (прежде всего, плотность) и её биологическое действие на организм при повышении давления, что позволяет учитывать и использовать эти эффекты при формировании ДГС.

Целью данной работы является физиологическая оценка влияния физических и биологических свойств газовых смесей и их компонентов на организм для обоснования стратегии формирования адекватной для гипербарических условий дыхательной смеси, обеспечивающей рабочую эффективность и безопасность водолазных погружений.

Методы исследования – экспериментальные и теоретические. Анализ экспериментальных данных, полученных авто-

ром при погружениях водолазов методом КП на различные глубины и методом ДП с использованием имитационного моделирования глубин в барокамерах наземных глубоководных водолазных комплексов. Обобщение результатов многолетних научных исследований функционального состояния человека в условиях повышенного давления в барокамерах и под водой в обитаемых гипербарических системах (научные подводные лаборатории, подводные аппараты с водолазными отсеками). Исследования проводились в различных гипербарических условиях в покое и во время физических нагрузок при дыхании смесью на основе азота и гелия с регистрацией специфических для данной среды реакций и показателей дыхательной функции.

Исследования в барокамере и под водой показывают, что наиболее выраженным эффектом гипербарии является повышение плотности дыхательной смеси, которое при постоянной температуре прямо зависит от роста давления. Априори можно считать, что влияние повышенной плотности ДГС выражается в увеличении сопротивления дыханию и механической работы дыхания. Это связано с расходом энергии и отражается в повышении общего потребления кислорода. В барокамере – в среднем на 5–8% в условиях покоя в диапазоне относительных плотностей примерно до 5,0 и в зависимости от легочной вентиляции. Известно, что в нормальных условиях энерготраты на дыхание в покое не превышают 2–3% от общих энерготрат, выраженных в потреблении кислорода, а при тяжелой физической работе – 10–15% и более [9]. В условиях гипербарии эти величины должны возрастать в зависимости от плотности, режима дыхания и физической нагрузки. Очевидно, что прирост потребления кислорода в условиях гипербарии поглощается дыхательными мышцами для поддержания легочной вентиляции. То есть обеспечение

дыхательной мускулатуры кислородом находится для организма в приоритете, но такое перераспределение кислорода в пользу дыхания приведет к снижению работоспособности под влиянием плотности, которая повышается из-за увеличения давления или глубины погружения. Это должно происходить как в «сухих» условиях барокамеры, так и при работе в воде. В последнем случае влияние плотности и обусловленного им повышенного сопротивления и работы дыхания усугубляется влиянием самого водолазного дыхательного аппарата. Поэтому общее потребление кислорода при работе в воде может резко возрастать по сравнению с аналогичной работой в «сухих» условиях барокамеры. Это – влияние аппарата. Но не только. При работе в воде есть ряд и других причин повышения энергообмена, например градиенты гидростатического давления в зависимости от положения тела и конструкции дыхательного аппарата, а также сопротивление водной среды и амуниции водолаза. Эти факторы создают сопротивление не только дыханию, но и движениям водолаза. Повышенный кислородный запрос может возникать и в связи с изменением теплообмена при работе в воде при недостаточном обогреве водолаза, поскольку теплопроводность воды почти в 25 раз, а теплоемкость в 4 раза выше, чем воздуха в нормальных условиях. Для удовлетворения повышенных потребностей в энергии при работе под водой требуется и большее поступление кислорода в легкие водолаза. Это может обеспечить только вентиляторная функция легких и повышенное содержание кислорода в дыхательной смеси.

Возросшее сопротивление и работа дыхания под действием плотности приводят к снижению произвольной максимальной вентиляции легких (МВЛ) на 18–20% на глубинах при дыхании из аппарата даже с хорошими техническими характеристиками (табл. 1).

Таблица 1

МВЛ (л/мин, ВТПС) у водолазов (8 чел.) в барокамере под влиянием дыхательного аппарата и плотностей кислородно-азотно-гелиевых смесей с  $PO_2 = 0,24$  кгс/см<sup>2</sup> при различных давлениях

Давление, кгс/см <sup>2</sup>	Плотность ДГС относительно воздуха	Дыхание без аппарата	Дыхание из аппарата	% МВЛ от дыхания без аппарата
1 (воздух)	1	189,1 ± 20,1	157,5 ± 17,1	83
11	2,31	142,2 ± 13,8	115,3 ± 10,3	81
21	3,94	119,1 ± 15,8	97,6 ± 14,1	82
25	4,50	111,6 ± 8,2	90,4 ± 10,5	81
31	5,32	101,2 ± 12,3	81,1 ± 12,0	80

Таблица 2

Повышение  $PACO_2$  (%) от величин при нормальном давлении у водолазов (8 чел.) в покое и во время работы в воде при дыхании из аппарата смесями равной плотности

Давление, кгс/см <sup>2</sup>	Дыхательная смесь	Плотность ДГС относительно воздуха	$PO_2$ в ДГС, кгс/см <sup>2</sup>	Покой	Работа 300 кгм/мин, 10 мин
31	O <sub>2</sub> -He	4,93	0,69	11,3	13,1
5	O <sub>2</sub> -N <sub>2</sub>	4,95	0,63	14,5	21,4

Это означает снижение резерва дыхания у водолазов, что отрицательно влияет на доставку кислорода в легкие при тяжелой работе и ограничивает работоспособность. Основные причины снижения МВЛ заключаются, вероятно, не только в трудности преодоления сопротивления дыханию в связи с плотностью ДГС, но и в коллапсе малых и средних бронхов в фазе выдоха. Считается, что это происходит вследствие образования разницы давлений между полостью бронхов и плевральным давлением при высокой легочной вентиляции, в том числе во время тяжелой работы. При этом, если водолаз и способен увеличить дыхательное усилие, его легочная вентиляция все равно не возрастает. Это его максимум на пониженном уровне, который, например, при дыхании их аппарата на имитируемой глубине 300 м составляет 43 % (81,1 л/мин) от величин в нормальных условиях (189,1 л/мин).

Легочная вентиляция во время физической работы снижается от уровня при нормальном давлении по мере увеличения нагрузки в условиях гипербарии. Это всегда сопровождается развитием гиперкапнии и респираторного ацидоза в организме, что указывает на недостаточную вентиляцию.

Парциальное давление  $CO_2$  в альвеолярной смеси ( $PACO_2$ ), которое определялось по  $PCO_2$  в конечной порции выдыхаемого газа (end tidal –  $PetCO_2$ ), повышается не только по причине снижения альвеолярной вентиляции под влиянием плотности, но и под действием азотного наркоза при дыхании O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> смесью (табл. 2).

Из этой таблицы видно, что при равной плотности и меньшем давлении водной среды  $PACO_2$  выше при действии наркотической ДГС на имитируемой в гидробарокамере глубине 40 м, где азотный наркоз проявлялся (по поведенческим реакциям и субъективным оценкам) у всех обследованных водолазов. Этому способствовало большее содержание азота в данной смеси по сравнению со сжатым воздухом. Но  $PACO_2$  во всех случаях не превышало 50 мм рт. ст. Все эти изменения показателей дыхательной функции приводят к снижению физической работоспособности. Результаты наших

исследований дают основание считать, что основной физиологический критерий работоспособности в условиях нормобарии – максимальное потребление кислорода (МПК) – существенно не изменяется при давлениях в барокамере до 31 кгс/см<sup>2</sup>, эквивалентных глубинам до 300 м. Уровень МПК достигается при сниженной в зависимости от величин плотности вентиляции легких за счет повышенного использования кислорода из 1 л легочной вентиляции. Можно с уверенностью полагать, что при этом доля потребления кислорода из общей величины МПК, направленная на обеспечение полезной работы, уменьшается из-за повышенного расхода кислорода на дыхание, в том числе благодаря подключению к работе дыхания дополнительных групп мышц. Так что истинная (эффективная для выполнения полезной работы) величина МПК в условиях гипербарии все-таки, вероятно, уменьшается, и это должно отражаться в еще большем снижении работоспособности при повышении плотности ДГС и работы дыхания с увеличением глубины погружения.

Маловероятно, что величина МПК сохранится также и в водной среде при тех же давлениях. Представляется очевидным, что и МВЛ, и МПК при дыхании из аппарата любого типа под водой на доступных глубинах под влиянием плотности ДГС и сопротивления воды должны быть меньше величин, регистрируемых в барокамере. При этом доля кислорода, направленная на обеспечение полезной работы, уменьшится за счет повышенного расхода кислорода на дыхание из-за плотности и преодоления других сопротивлений в водной среде. Увеличение содержания кислорода и, соответственно,  $PO_2$  в дыхательной смеси будет не более чем компромиссным решением проблемы, так как это может привести к возникновению других сложностей, связанных с токсическим действием кислорода на организм и еще большим ограничением вентиляции легких в связи с дополнительным увеличением плотности дыхательной смеси при добавлении относительно тяжелого компонента-кислорода.

Рассмотренные эффекты влияния плотности на легочное дыхание и газообмен обосновывают необходимость её снижения при формировании ДГС. Это может быть достигнуто только за счет использования в основе состава смеси наиболее легких по сравнению с азотом инертных газов – неона, гелия, водорода или смеси этих газов в определенных соотношениях.

Парциальное давление кислорода в составе водолазных дыхательных смесей должно строго поддерживаться в пределах допустимых значений во избежание развития гипоксии или интоксикации кислородом [10]. Следовательно, стратегия формирования ДГС относительно кислорода направлена на исключение этих опасных факторов. Поэтому нормирование кислорода в искусственных газовых смесях направлено на решение важнейшей задачи – определение нижней границы  $PO_2$ , которое обеспечивало бы потребности организма в кислороде в покое и при физической нагрузке и определение верхней границы  $PO_2$ , которое не вызывало бы токсических проявлений у водолаза.

Имитационное моделирование погружений в барокамерах водолазных комплексов показало, что все основные факторы гипербарической дыхательной среды (давление, плотность, температура, влажность), воздействуя прямо или опосредованно на функции организма водолаза (дыхание, теплообмен и другие), создают условия для повышенного энергообмена и кислородного запроса в организме, особенно в водной среде. Поэтому  $PO_2$  в дыхательных смесях, как правило, находится в диапазоне величин выше нормоксического уровня ( $0,21 \text{ кгс/см}^2$ ), соответствующего нормальному давлению. Гипоксический уровень ДГС при этом не обсуждается, этого не должно быть. Любая водолазная ДГС не должна быть причиной развития гипоксии в организме, так же как и причиной кислородной интоксикации. К таким экстремальным медицинским ситуациям могут привести: несоблюдение установленных правил, аварийные ситуации, технические сбои в работе водолазного снаряжения, оборудования и некоторые другие факторы, не связанные с газовым составом смеси.

Реакции организма уже примерно на двукратно (относительно нормобарии) повышенное  $PO_2$  независимо от уровня гипербарии появляются прежде всего в дыхательной системе. Снижение легочной вентиляции при кратковременных воздействиях такой гипероксии приводит к повышению  $PCO_2$  в альвеолярной смеси и артериальной крови, которое и без того может

иметь место под влиянием повышенной плотности в барокамере. Но при длительном (многосуточном) воздействии в условиях гипербарии даже такая умеренная гипероксия ( $PO_2$  немногим выше  $0,40 \text{ кгс/см}^2$ , что соответствует 40% кислорода в нормальных условиях) может приводить к появлению симптоматики кислородной интоксикации. В связи с этим общепринятый допустимый предел  $PO_2$  для длительного воздействия в условиях повышенного давления не должен превышать этот уровень [9]. Но на практике допустимый предел  $PO_2$  не применяется, а используются меньшие величины, соответственно действующим правилам и нормам.

Развитию токсического действия кислорода может способствовать, как известно, и задержка выведения  $CO_2$  из организма. Независимо от причин развития нежелательных реакций организма на действие недостатка или избытка кислорода они должны учитываться при формировании состава ДГС. Но в любом случае диапазон допустимых величин  $PO_2$  должен обеспечивать оптимальное физиологическое состояние водолаза для выполнения рабочих заданий под водой и в барокамере. Следует отметить, что токсические уровни чистого кислорода при спусках методом КП в зарубежных (США) и российских правилах несопоставимы. Американские требования (NOAA – Национальное управление по исследованию океанов и атмосферы) ограничивают водолазные спуски при дыхании чистым кислородом 6 м ( $PO_2 - 1,6 \text{ кгс/см}^2$ ), тогда как российские (Межотраслевые правила по охране труда при проведении водолазных работ. ПОТ Р М-030-2007 и другие) допускают погружения до 20 м ( $PO_2 - 3,0 \text{ кгс/см}^2$ ) с выполнением физической работы, которая, кстати, приводит к сокращению времени начала развития интоксикации. Однако на основании результатов исследований предлагается сохранить допустимую в России глубину 20 м при дыхании чистым кислородом, но ограничить экспозицию 10–15 минутами при любой степени физической нагрузки [11].

Не менее важным в общей физиологической стратегии формирования дыхательных смесей для водолазных погружений является сведение к минимуму влияния азота (азотный наркоз) и гелия (нервный синдром высокого давления – НСВД) на организм. Эти влияния проявляются в неврологических расстройствах при погружениях с использованием дыхательных смесей на основе этих газов.

Первые признаки азотного наркоза при дыхании сжатым воздухом появля-

ются обычно на глубинах порядка 30–35 м (давление 4–4,5 кгс/см<sup>2</sup>) с отклонениями в зависимости от индивидуальной предрасположенности к наркозу и проявляются (в барокамере) в легкой эйфории, беспричинной веселости, излишней разговорчивости. В целом реакции на азотный наркоз сравнимы с действием алкоголя. При возрастании глубины наркоз проявляется в изменении поведенческих реакций, нарушении умственной деятельности, усилении эйфории, появлении беспричинного смеха, ложного чувства безопасности и других, иногда опасных, реакциях. При декомпрессии водолаз быстро приходит в норму, но чаще всего не помнит, что с ним происходило на глубине. Такие проявления азотно-го наркоза являются одной из причин ограничения глубины погружения при дыхании сжатым воздухом и снижении парциального давления азота с увеличением глубины погружения при дыхании кислородно-азотно-гелиевыми смесями (тримикс).

Проявления нервного синдрома высоко-го давления возникают при дыхании кислородно-гелиевыми смесями в зоне больших глубин – примерно свыше 150 м. Это выражается в треморе рук, нарушении координации движений, ориентации в действиях и пространстве, появлении спутанности сознания, тошноты и других нежелательных реакций. Общеизвестно, что проявления НСВД зависят от величины давления и скорости компрессии (погружения). Многочисленные исследования в России и за рубежом и мировая практика водолазных погружений показали, что этот синдром достаточно эффективно ослабляется снижением скорости компрессии, дополнительными остановками при погружении и внесением в дыхательную смесь небольшого количества азота или водорода [12]. Поэтому, а также и по некоторым другим причинам, почти все дыхательные смеси, предназначенные для глубоководных водолазных спусков методами КП и ДП, имеют в своем составе азот. Исключение (согласно Правилам водолазной службы ВМФ (ПВС ВМФ-2002) составляют: смесь для спусков методом КП на глубины от 160 до 200 м и смесь для работы на грунте при выходе в воду из условий длительного пребывания в жилой барокамере глубоководного водолазного комплекса. В этих случаях отсутствие азота в смеси выражается в исключении азотного наркоза и в снижении плотности ДГС, что сводит к минимуму повышение сопротивления и работы дыхания при выполнении заданий под водой.

В принципе все проблемы, связанные с влиянием инертного газа на организм (наркоз, НСВД и декомпрессионные расстрой-

ства), могут быть решены путем перехода с дыхания газовой смесью на жидкостное. Эффект такого дыхания обусловлен тем, что в дыхательной жидкости не содержатся никакие инертные газы. В нашей лаборатории проводились исследования на лабораторных животных по этой проблеме. Было показано, что животные, по крайней мере в пределах одного часа, могут дышать оксигенированной жидкостью (перфторорганические соединения), которая в 1600 раз тяжелее воздуха при нормальном давлении [13]. Но этот способ дыхания может в будущем иметь перспективу, вероятно, только при спасении человека под водой и при решении некоторых экстраординарных задач на больших глубинах.

Все вышерассмотренные эффекты влияния основных физических и физиологических факторов на организм водолазов и акванавтов в условиях гипербарии (под водой или в барокамере) могут управляться воздействием дыхательной смеси того или иного состава. Это определяет физиологическую стратегию формирования ДГС, которая включает основные направления:

- снижение плотности ДГС путем замены относительно тяжелого инертного компонента смеси более легким, это приводит к понижению нагрузки на легочное дыхание и кардиореспираторную систему, повышает элиминацию CO<sub>2</sub> из организма и поддерживает работоспособность водолазов в условиях гипербарии;

- сохранение парциального давления кислорода в диапазоне допустимых величин во избежание развития кислородной недостаточности или токсичности при любых физиологических состояниях (покой, работа) и в любых условиях (барокамера, под водой), это поддерживает общее функциональное состояние организма, умственную и физическую работоспособность;

- минимизацию азотного наркоза или его исключение путем ограничения глубины погружения с использованием кислородно-азотных смесей или замены азота в смеси на ненаркотичные газы при глубоководных погружениях;

- ослабление НСВД при глубоководных спусках путем добавления азота в состав смеси, который в условиях гипербарии действует как физиологический антагонист гелия.

Главными в реализации этих направлений являются два аспекта: обоснованный газовый состав дыхательных смесей по диапазонам глубин и количественное соотношение компонентов смеси в зависимости от длительности пребывания в условиях гипербарии и работы под водой.

### Заключение

С учетом рассмотренных влияний факторов гипербарии на функции организма главное в физиологической стратегии формирования водолазных ДГС заключается в снижении плотности дыхательных смесей. Это направлено на снижение сопротивления и работы дыхания, что поддерживает вентиляторную функцию легких и минимизирует её влияние как одного из главных факторов, лимитирующих работоспособность человека на глубине. При этом не менее важное значение имеют поддержание парциальных давлений кислорода и азота в ДГС в пределах допустимых величин, так как кислород вне этих пределов может вызвать или гипоксические, или гипероксические реакции вплоть до патологических, а азот – наркотические, опасные для водолаза. Поэтому при формировании водолазных ДГС следует учитывать влияние каждого компонента ДГС на данной глубине. При глубоководных погружениях, помимо влияния плотности, возможного токсического действия кислорода и азотного наркоза, важным является нервный синдром высокого давления, который «тормозит» погружение проявлением неблагоприятных и даже опасных реакций организма. Но в данном случае проблема решается не только с помощью дыхательной смеси, но и путем снижения скорости погружения и увеличения количества и длительности остановок в процессе спуска.

Физиологические аспекты стратегии формирования ДГС относятся к любым смесям для работы в условиях гипербарии в барокамерах водолазных комплексов и под водой. Развитие водолазных технологий тесно связано с разработкой эффективных, безопасных дыхательных смесей и методиками их использования. Это в первую очередь относится к «смесевым» аппаратам с замкнутой схемой дыхания типа «ребризер», которые отличаются возможностью изменения под водой газового состава ДГС, поддержания постоянного  $PO_2$  на глубинах и другими преимуществами [14]. Активно развивается и технология водолазных спусков с использованием кислородно-азотных смесей на средних (до 60 м) глубинах. Изменяя соотношения этих компонентов в смеси, минимизируются проявления азотного наркоза, сокращается время декомпрессии или даже отпадает необходимость её проведения при определенных режимах

погружения, поддерживается работоспособность [15]. Все положительные эффекты дыхания искусственными ДГС позволяют расширить области их практического использования производственными и научными водолазами.

*Данная работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № 0128-2021-0011).*

### Список литературы

1. Единые правила безопасности труда на водолазных работах. Ч. 2. Медицинское обеспечение водолазов. М.: Моркнига, 2021. 132 с.
2. Зальцман Г.Л., Кучук Г.А., Гургенидзе А.Г. Основы гипербарической физиологии. Л.: Медицина, 1979. 320 с.
3. Смолин В.В., Соколов Г.М., Павлов Б.Н. Водолазные спуски до 60 метров и их медицинское обеспечение. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Слово, 2013. 608 с.
4. Чумаков А.В. Длительное пребывание человека на предельных глубинах, взгляд на изменения функциональных систем акванавтов с позиции патофизиологии критических состояний // Клиническая патофизиология. 2016. Т. 22. № 4. С. 118–123.
5. Яхонтов Б.О. Физиологические принципы оптимизации водолазных дыхательных газовых смесей // Нептун. Водолазный проект. 2014. № 5. С. 74–79.
6. Гусейнов Т.Ю., Семенов В.Н. Забытый мировой рекорд // Нептун. Водолазный проект. 2012. № 1. С. 88–97.
7. Суворов А.В. Дыхание и газообмен человека в условиях высокой плотности газовой среды: 14.00.13: автореф. дис. ... докт. мед. наук. Москва, 1998. 44 с.
8. Аточин Д.Н. Оксигенация и кровоснабжение головного мозга животных при дыхании газовыми смесями высокой плотности: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Санкт-Петербург, 1992. 22 с.
9. Кисляков Ю.Я., Бреслав И.С. Дыхание, динамика газов и работоспособность при гипербарии. Л.: Наука, 1988. 237 с.
10. Яхонтов Б.О. Физиологические аспекты обеспечения жизнедеятельности водолазов при повышенном давлении в барокамере // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 6. С. 135–139.
11. Бакланов Д.В. Особенности патогенеза острого кислородного отравления у водолазов и подводников: дис. ... канд. мед. наук. Санкт-Петербург, 2015. 132 с.
12. High-pressure nervous syndrome Нервный синдром высокого давления [Электронный ресурс]. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/High-pressure\\_nervous\\_syndrome](https://en.wikipedia.org/wiki/High-pressure_nervous_syndrome) (дата обращения: 22.07.2021).
13. Яхонтов Б.О. Физиологические факторы, лимитирующие глубину водолазных погружений // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 7. С. 23–30.
14. Черкашин С.В. Глубоководные водолазные спуски в автономном режиме. Перспективы развития // Подводные технологии и средства освоения Мирового океана. М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2011. С. 518–527.
15. Яхонтов Б.О. Водолазные методы океанологических исследований // Океанология. 2021. Т. 61. № 3. С. 491–497.



СТАТЬИ

УДК 615.838.7:613.495

**РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУРЫ КРЕМ-МАСКИ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО  
ИЗ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ МАРГАНЕЦСОДЕРЖАЩИХ РУД**

<sup>1</sup>Чурадзе Л.И., <sup>2</sup>Чагелишвили В.А., <sup>1</sup>Кахетелидзе М.Б.,  
<sup>2</sup>Маградзе Г.Т., <sup>1</sup>Явич П.А., <sup>1</sup>Мсхиладзе Л.В.

<sup>1</sup>*Институт фармакохимии им. И. Кутателадзе Тбилисского государственного  
медицинского университета, Тбилиси, e-mail: l.mskhiladze@tsmu.edu;*

<sup>2</sup>*Институт неорганической химии и электрохимии им. Р. Агладзе Тбилисского  
государственного университета им. И. Джавахишвили, Тбилиси*

В настоящее время в Грузии создана технология получения мелкодисперсной двуокиси кремния из отходов производства металлического марганца. В данной статье рассматривается вопрос разработки рецептуры крем-маски с использованием получаемого диоксида кремния. В процессе исследования наряду с диоксидом кремния применены некоторые экстракты и масла растительного происхождения, а также ряд других биологически активных веществ. При изучении физико-химических характеристик полученного продукта использовались тесты по ГОСТ 31460-2012 кремы косметические и, дополнительно, ряд тестов, позволяющих также оценить его качество. В результате проведенного исследования разработана соответствующая рецептура коллоидно- и термостабильной крем-маски. Изучение возможности высвобождения биологически активных веществ из крема методом диффузии в 5% агаровый гель для «микробиологических целей» показало, что можно предположить проникновение их в кожный покров в достаточном количестве. При изучении осмотической активности крем-маски получены следующие данные: ее величина в среднем составляет 180–190%, процесс начинается в среднем в течение первых 60–70 минут, при постоянном увеличении. Наличие такого показателя дает возможность прогнозировать достаточно большой отток гнойно-некротического содержимого из гнойных прыщей, что является необходимым требованием к кремам и мазям, предназначенным в лечебной косметической медицине для лечения проблемной кожи. Установление возможной степени намазываемости методом двух стекол показало, что диаметр образующихся пятен составил 40–43 мм. Это свидетельствует о достаточной величине наносимости крема на кожу. Результаты исследования разработанного крема позволяют прогнозировать его успешное применение в косметической практике.

**Ключевые слова:** диоксид кремния, марганец, мази, кремы, кожа, растения, методы исследования

**DEVELOPMENT OF A CREAM MASK FORMULATION USING SILICON  
DIOXIDE OBTAINED FROM MANGANESE PRODUCTION WASTE**

<sup>1</sup>Churadze L.I., <sup>2</sup>Chagelishvili V.A., <sup>1</sup>Kakhetelidze M.B.,  
<sup>2</sup>Magradze G.T., <sup>1</sup>Yavich P.A., <sup>1</sup>Mskhiladze L.V.

<sup>1</sup>*Institute of Pharmacochemistry, I. Kutateladze of Tbilisi State Medical University,  
Tbilisi, e-mail: l.mskhiladze@tsmu.edu;*

<sup>2</sup>*Institute of Inorganic Chemistry and Electrochemistry R. Agladze Tbilisi State University  
I. Javakhishvili, Tbilisi*

At present, a technology has been created in Georgia for producing finely dispersed silicon dioxide from metal manganese metal production wastes. This article discusses the development of a cream mask formulation using the resulting silicon dioxide. In the course of the research, along with silicon dioxide, some extracts and oils of vegetable origin, as well as a number of other biologically active substances were used. When studying the physicochemical characteristics of the resulting product, tests were used according to GOST 31460-2012 cosmetic creams and, in addition, a number of tests, allowing to evaluate its quality. As a result of the research, the corresponding formulation of the colloidal and heat-stable cream mask was developed. The study of the possibility of release of biologically active substances from the cream by diffusion in a 5% agar gel for “microbiological purposes” showed that it is possible to assume their penetration into the skin in sufficient quantities. When studying the osmotic activity of the cream mask, the following data were obtained, its value is on average 180-190%, the process begins on average within the first 60-70 minutes, with a constant increase. The presence of such an indicator makes it possible to predict a sufficiently large outflow of purulent-necrotic discharge from purulent acne, which is a necessary requirement for creams and ointments intended in medical cosmetic medicine for the treatment of problem skin. Establishment of the possible degree of spreading by the method of 2 glasses, showed that the diameter of the formed spots was 40-43 mm. This testifies to the sufficient amount of cream applied to the skin. Conclusions. The results of the study of the developed cream make it possible to predict its successful use in cosmetic practice.

**Keywords:** silicon dioxide, manganese, ointments, creams, skin, plants, research methods

Профилактика преждевременного старения кожи является одной из наиболее актуальных медико-социальных проблем, решение которой – это регулярное внимательное наблюдение и соответствующий уход за кожей лица и тела путем регулярных (как ежедневных, так и несколько раз в неделю) соответствующих косметических процедур. Фактически это улучшение процессов, происходящих на клеточном уровне. Основное действие косметики проявляется в следующих направлениях: защита, очищение, увлажнение, питание и профилактика. Действие косметического средства в комплексном варианте обусловлено медико-косметологическим действием всего состава использованных в препарате компонентов. Это в первую очередь учитывая влияние внешней среды на старение кожи, их защитные свойства от действия солнечного излучения и перепадов температурного режима, питательные, очищающие свойства, установление оптимального уровня влаго- и жиросодержания кожи, что позволяет с помощью маски усилить процесс клеточного обновления и восстановления кожи. Поэтому более перспективны косметологические препараты комплексного действия. Кожа – наибольший орган организма человека, который фактически является барьером для проникновения микробов и токсичных веществ. Наряду с этим это фактор психологического воздействия и общения. Следует учитывать, что типы кожи лица можно подразделить на такие группы, как нормальная, сухая или жирная, аллергичная или нет, пигментированная, непигментированная. Тип кожи может изменяться в течение жизни из-за различий в секреции кожного сала, которая неоднородна на всей площади лица – лоб, нос, обе щеки и подбородок. Исходя из литературных данных, средняя секреция кожного сала в норме для всей площади лица должна составлять 118,7–180,9 мкг/см<sup>2</sup>, при уровне рН 5,6–6,0 (присутствие в секрете кожного сала, пота и кератина). Однако в случае сухой кожи этот показатель уменьшается до 97,3–147,6 мкг/см<sup>2</sup>, при жирной увеличивается до 204,6–235,4, а при комбинированной изменяется до 109,8–145,5 мкг/см<sup>2</sup>. Соответственно изменяется рН. Второй фактор – содержание воды в коже (состояние гидратации рогового слоя) – здоровье, эстетика и внешний вид кожи. На вид кожи оказывает влияние воздействие ультрафиолетового излучения (особенно в странах с жарким климатом, даже сезонным), тип режима в течение суток, принимаемые лекарственные препараты, естественное старение. Поэтому необходимо использовать

акнегенные, некомедогенные и гипоаллергенные косметические препараты, легко наносимые на кожу, содержащие набор компонентов, учитывающих возможные изменения и способные оказывать эффективное воздействие на кожу. К таковым относятся маски для лица, легко наносимые и оказывающие быстрое и эффективное воздействие на кожу. В состав масок входят биоактивные лекарственные компоненты, способные изменять количество себума и влажности кожи, эксфолианты, осветляющие и другие. Это могут быть как минеральные, так и растительные и животные ингредиенты. Нанесенная маска должна, за счет лекарственного эффекта, поддерживать необходимый внешний вид кожи. В настоящее время выпускаются маски, отличающиеся не только составом, но и лекарственной формой: в виде геля, эмульсии, паст, листового варианта. Каждая из лекарственных форм имеет свои плюсы и минусы. Так есть данные, что листовые маски не рекомендуется использовать при жирной либо подверженной прыщам кожи, так как благодаря тепловому эффекту повышается количество бактерий на ее поверхности, увеличивается время испарения водной фазы и время, необходимое лекарственным компонентам для более глубокого проникновения в кожу. Зависит и от типа подложки – различные трикотажные хлопковые ткани, целлюлозы, гидрогели, фольга, восковые маски, так называемый пузырящийся лист и т.п. При этом следует учитывать баланс содержания воды между роговым слоем и липидами поверхности кожи. Некоторые материалы, такие как различные виды глин, которые часто рекомендуются к использованию в косметических препаратах, обычно иммобилизуются на субстрате, что повышает легкость использования. Однако этот тип масок образует пленку на коже, что уменьшает способность кожи к поглощению влаги из воздуха. Аналогично маски на основе коллагена. Хотя белки – эффективные вещества для упругости и омоложения кожи, а коллаген – один из ведущих белков дерматологического слоя кожи, который с возрастом уменьшается, он все же имеет ограничения в использовании из-за его низкой проницаемости в верхний и роговой слой кожи. На наш взгляд, более перспективны смываемые крем-маски, которые можно отнести к универсальной категории. К их преимуществам следует отнести легкость как нанесения, так и удаления избытка, возможность использования в их составе широкого набора ингредиентов с различной направленностью действия. Косметические средства, содержащие в своем со-

стае соединения кремния, при нанесении на кожу способны очищать и обновлять клетки кожи, благодаря сорбции накожных шлаков и токсинов. Подобные косметические препараты уменьшают воспалительные процессы кожи, количество прыщей и угрей. В определенной мере это связано с тем, что абсорбируется определенное количество жира и пота (при жирной и комбинированной коже), избавляя кожу от жирного блеска, благодаря чему сужаются поры, кожа тонизируется. Кремнесодержащие кремы и маски способствуют рассеиванию света, тем самым уменьшая вид тонких линий и морщин на коже, создавая эффект оптического размывания; возможно их применение в роли щадящего абразива в средствах для проведения пилинга кожи и удаления грязи, абсорбированной на коже; оказывают антиоксидантное, тонизирующее и омолаживающее действие. Старение кожи связано с атрофией, уменьшением фибробластов, истончением кровеносных сосудов. При этом особенно страдают коллагеновые волокна. Одной из основных причин появления морщин является уменьшение выработки коллагена. Кремний необходим для оптимального синтеза коллагена, активации ферментов гидроксилирования, улучшения силы и эластичности кожи [1–3].

Целью исследования является разработка рецептуры крем-маски с применением диоксида кремния, получаемого из отходов производства марганца. В Грузии при получении металлического марганца образуются техногенные отходы в количестве 50% от переработанной массы руды, которые содержат двуокись кремния. В настоящее время в Институте неорганической химии и электрохимии им. Р. Агладзе Тбилисского государственного университета им. Н. Джавахишвили под руководством доктора хим. наук В.А. Чагелишвили разработан азотно-кислый метод переработки этого сырья с последующей очисткой. В качестве конечного продукта получается мелкодисперсный порошок двуокиси кремния с дисперсностью частиц менее 0,05 мкм, с содержанием основного вещества до 96–97%.

#### Материалы и методы исследования

В процессе проведения исследования наряду с диоксидом кремния применены некоторые экстракты и масла растительного происхождения с характерными для них свойствами: противомикробными, противовоспалительными, противогрибковыми, антиоксидантными, антибактериальными и антисептическими; салициловая кислота (мягкий химический пилинг, антисептические свойства) и др. Основными особенностями применения

крем-масок является обогащение кожи биологически активными веществами растительного и минерального происхождения, что позволяет устранить или уменьшить количество угревой сыпи на лице, уменьшить жирность кожи, смягчить и увлажнить ее, обеспечить тонизирующий и освежающий эффект вялой, усталой коже, который заметно омолаживает возрастную кожу. В результате чего достигается отшелушивание, тонизирование, питание, восстановление, очищение, увлажнение, выравнивание микроструктуры кожи. При изучении физико-химических характеристик получаемого продукта использовались тесты по ГОСТ 31460-2012. Кремы косметические [4], а также дополнительно ряд тестов, позволяющих оценить его качество [5–7].

#### Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим основной химический состав и фармакологический эффект использованных экстрактов и масел. Сухой экстракт из листьев и стеблей зеленого чая (*Extract de siccis viridi tea foliis et caulibus condensata*) содержит полифенолы – эпигаллокатехин-3-галлат (EGCG), эпигаллокатехин (EGC), флавоноид кверцетин, витамины С и Е. Проявляет антиоксидантное, цитопротекторное и антиканцерогенное действие. Благодаря кардиоваскулярному и антиатерогенному действию флавоноидов зеленого чая, улучшается микроциркуляция и тонус кровеносных сосудов. Благодаря антиоксидантному действию крем защищает кожу от воздействия вредных веществ и ультрафиолетового излучения, являясь средством ухода за смешанной, чувствительной, поврежденной, зрелой кожей лица [8, 9]. Лист алоэ древовидного (*Folium arboris cervisia*) содержат оксиметилантрахиноны, антрагликозиды, дикарбоновые кислоты, оксикислоты жирного ряда, ароматические кислоты, витамины, ферменты, фитонциды, биогенные стимуляторы. При наружном применении препараты усиливают репаративные процессы, оказывают ранозаживляющее, радиопротекторное, противовоспалительное, бактериостатическое и бактерицидное действие в отношении различных групп микробов, используются при лечении многих кожных заболеваний. Полисахариды из листа алоэ способны стимулировать рост новых клеток, предотвращают образование рубцов [10]. Экстракт из цветков и стеблей календулы (*Et flos Calendula derivantur extract*) содержит каротиноиды, флавоноиды, эфирное масло, стерины, тритерпеноиды, полисахариды, микро- и макроэлементы. Проявляет бактерицидные, противовоспа-

лительные, антибактериальные, антисептические, антиоксидантные, заживляющие свойства, стимулирует кровообращение и лимфодренаж [11].

Растительные масла, содержащие большое количество олеиновой кислоты, нормализуют липидный обмен, повышают упругость, эластичность, укрепляют стенки кровеносных сосудов, обладают способностью к удерживанию влаги. В состав крем-маски входят масла из косточек миндаля и виноградных косточек, содержащие до 70% олеиновой кислоты [12]. Количество масел варьируется в зависимости от типа кожи пациента. Использование в составе масок серы медицинской обусловлено ее антисептическими свойствами, оказывает противомикробное и противопаразитарное действие. Эфирные масла обладают антисептическими, ранозаживляющими, антибактериальными, противогрибковыми, антиоксидантными свойствами. Использованы масла плодов лимона и листа эвкалипта (растения, произрастающие в Грузии), обладающие антисептическими, ранозаживляющими, антибактериальными, противогрибковыми, антиоксидантными свойствами.

В результате проведенного исследования была разработана рецептура крем-маски следующего состава, которая удовлетворяла всем требованиям ГОСТ: Моноглицериды дистиллированные 10,0%, цетилпальмитат 6,5%, эмульсионный воск 4,0%, высокодисперсный диоксид кремния – в зависимости от тяжести заболевания кожи 5–10,0%, глицерин 9,5%, сера медицинская 2,0%, кислота салициловая 2,1%, масло из косточек винограда 2,0%, масло из косточек миндаля 1,5%, эфирное масло из кожуры лимона 0,2%, эфирное масло из листьев эвкалипта 0,2%, карбопол 940 2,5%, полисорбат 60 3,0%, сухой экстракт из листа алоэ древовидного 1,5%, сухой экстракт из цветков и стеблей календулы (*Calendula officinalis*) 1,5%, сухой экстракт из листьев и стеблей зеленого чая 1,5%, вода обессоленная до 100%. Изучение возможности высвобождения биологически активных веществ из крем-маски проводилось методом диффузии в 5% агаровый гель для «микробиологических целей», приготовленный на дистиллированной воде. Учитывая, что в большинстве использованных биологически активных веществ имеются полифенольные и фенольные компоненты, в качестве индикаторов использовались водный и спиртовой растворы хлорида железа 3%-ного и 5%-ный раствор алюминия хлорида в 70% спирте этиловом. Сравнительная оценка эффективности проводилась путем измерения диаметра пятна

окрашенной или флюоресцирующей зоны, образовавшейся вокруг вырезанной лунки в геле. Судя по полученным данным, за 12 ч диаметр пятна окрашенной зоны увеличился с 1,14 до 3,41 см, что позволяет предположить возможность проникновения их в кожный покров в достаточном количестве. Определение величины осмотической активности показало, что во всех вариантах рецептуры кремов величина ее составляла 170–190%, увеличение проявляется в среднем в течение уже первых 40–50 мин. Максимум достигается через 15–16 ч. Наличие такого показателя дает возможность прогнозировать достаточно большой отток гнойно-некротического содержимого из гнойных прыщей, что является необходимым требованием к кремам и мазям, предназначенным в лечебной косметической медицине для лечения проблемной кожи. Установление возможной степени намазываемости проводилось методом двух стекол. Диаметр образующихся пятен составил 40–43 мм, что дает возможность прогнозировать достаточную величину вязкости крема при нанесении на кожу.

Методика использования крем-маски. Теплой водой очистить кожу от макияжа и других загрязнений. Распределить крем-маску по лицу, шее, декольте и осторожно вокруг глаз. Наносить нужно таким относительно густым слоем, чтобы кожа просвечивала сквозь слой крем-маски. В течение определенного времени слой маски будет уменьшаться за счет поглощения кожей. Держать крем-маску необходимо 20–30 мин, в зависимости от вида кожи и связанной с ней эффективности действия. В определенных случаях, по рекомендации врача-косметолога, до нескольких часов. Наносится маска через день в течение двух недель. За это время маска станет мощным бустером для клеток кожи. После курса можно применять маску 2–3 раза в неделю.

### Заключение

Результаты исследования разработанного крема позволяют прогнозировать его успешное применение в косметической практике.

### Список литературы

1. Jurkić L.M., Čepanec I., Pavelić S.K., Pavelić K. Biological and therapeutic effects of ortho-silicic acid and some ortho-silicic acid-releasing compounds: New perspectives for therapy. *Nutr Metab (Lond)*. 2013. Vol. 10. No. 2. P. 10.
2. Nakanishi L., Bombonatti B., Sabo M.L., Tadeu V.R., Robles VMV. Oralsupplementation of orthosilicic acid and its impact on hair quality. *Med Cutanlber Lat Am*. 2017. Vol. 45. No. 1. P. 254–262.
3. Araújo L.A., Addor F., Gonçalves P.M., Campos M. Use of silicon for skin and hair care: an approach of chemical forms

- available and efficacy. *An Brasil Dermatol.* 2016. Vol. 91. No. 3. P. 331–335.
4. ГОСТ 31460-2012 Кремы косметические. Общие технические условия. Межгосударственный стандарт. Cosmetic creams. General specifications. М.: Стандартинформ, 2012. С. 4.
5. Хаджиева З.Д., Тигиева З.Б. Исследования по выбору оптимальной мазевой основы наружной лекарственной формы для лечения атопического дерматита // *Фундаментальные исследования.* 2010. № 11. С. 155–158.
6. Солдатова Е.С. Разработка схемы комплексного лечения воспалительных заболеваний пародонта: дис. ... канд. мед. наук: 14.01.14. Уфа, 2018. 132 с.
7. Ерофеева Л.И., Сучкова Д.Ф. Изучение факторов, влияющих на высвобождение лекарственных средств из мазей // *Медицина.* 2019. № 14. С. 34–42.
8. Du G.J., Zhang Z., Wen X.D., C. Yu., Calway T., Yuan C.S. EpigallocatechinGallate (EGCG) Is the Most Effective Cancer Chemopreventive Polyphenol in Green Tea / *Nutrients.* 2012. Vol. 4. No. 11. P. 1679–1691.
9. Borgwardt S., Hammann F., Scheffler K., Kreuter M., Drewe J., Beglinger C. Neural effect of green tea extract on dorsolateral prefrontal cortex. *Eur J Clin Nutr.* 2012. Vol. 66. No. 11. P. 1187–1192.
10. Олейников Д.Н., Зилфикаров И.Н., Ибрагимов Т.А., Торопова А.А. Химический состав сока алое древовидного (*Aloe Arborescens* mill.) и его антиоксидантная активность (*In vitro*) // *Химия растительного сырья.* 2010. № 3. С. 83–90.
11. Guest J., Grant R. “Carotenoids and neurobiological health,” *The Benefits of Natural Products for Neurodegenerative Diseases.* 2016. Vol. 12. P. 199–228.
12. Воловик В.Т., Леонидова Т.В., Коровина Л.М., Блохина Н.А., Касарина Н.П. Сравнение жирнокислотного состава различных пищевых масел // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* 2019. № 5. С. 147–152.

УДК 519.6

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ПОДЪЕМОМ РАКЕТЫ-ЗОНДА С УТОЧНЕНИЕМ МОДЕЛИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Мозжорина Т.Ю., Попов А.С.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет), Москва, e-mail: mozzhorina@mail.ru*

В данной работе решается задача оптимального управления метеорологической ракетой-зондом при ее вертикальном подъеме с уточнением математической модели аэродинамического сопротивления, что отличает ее от предшествующих исследований, посвященных этому вопросу. Оптимизация основана на применении принципа максимума Понтрягина и численных методов. Качественное решение данной задачи оптимального управления известно: вначале тяга должна быть максимально возможной, в дальнейшем, начиная с какого-то момента времени, следует ее уменьшить. Управление на участке пониженной тяги является здесь особым режимом управления. Проведен численный эксперимент, показавший, что наличие особого режима при оптимальном управлении связано с аэродинамическим сопротивлением. Осуществлена попытка решения краевой задачи оптимального управления с переключением и с наличием особого режима управления методом пристрелки. В качестве исходных данных взяты технические характеристики ракеты MR-20. В настоящее время особый режим управления для метеорологических ракет вертикального взлета не применяется в силу необходимости использования регулируемого твердотопливного двигателя, создание которого представляет собой некоторые технические сложности. В силу этого представляет интерес возможность количественной оценки преимуществ, которые может дать оптимальное управление тягой двигателя при наличии особого режима управления. Проводится численный анализ эффективности применения особого режима управления.

**Ключевые слова:** оптимальное управление, принцип максимума Понтрягина, режим особого управления, метод пристрелки решения краевых задач, метеорологическая ракета-зонд

## SOLUTION OF THE PROBLEM OF OPTIMUM CONTROL OF THE VERTICAL LIFT OF THE PROBE ROCKET WITH REFINING THE AERODYNAMIC RESISTANCE MODEL

Mozzhorina T.Yu., Popov A.S.

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, e-mail: mozzhorina@mail.ru*

This paper solves the problem of optimal control of a meteorological probe rocket during its vertical ascent with the refinement of the mathematical model of aerodynamic drag, which distinguishes it from previous studies devoted to this issue. Optimization is based on the application of the Pontryagin maximum principle and numerical methods. The qualitative solution of this problem of the optimal control is known: at first, the thrust should be as high as possible, then, starting from a certain point in time, it should be reduced. Low thrust control is a special control mode here. A numerical experiment has been carried out, which showed that the presence of a special regime under optimal control is associated with aerodynamic drag. An attempt is made to solve the boundary value problem of optimal control with switching and with the presence of a special control mode by the shooting method. The technical characteristics of the MR-20 rocket were taken as the initial data. Currently, the special control mode for vertical take-off meteorological rockets is not applied due to the need to use a regulated solid-propellant engine, the creation of which presents some technical difficulties. Because of this, it is of interest to be able to quantify the benefits that can be obtained from optimal engine thrust control in the presence of a special control mode. A numerical analysis of the effectiveness of the use of a special control mode is carried out.

**Keywords:** optimal control, Pontryagin's maximum principle, special control mode, shooting method for solving boundary value problems, meteorological probe rocket

Эта классическая задача оптимального управления ранее была неоднократно решена и результаты представлены в таких работах, как [1, 2]. Следует, однако, отметить, что для аэродинамического сопротивления в них были использованы упрощенные зависимости. В [1] полуэмпирическая формула для аэродинамического сопротивления

$$X_{\text{аэп}} = \frac{c_x \rho V^2 S}{2},$$

где  $c_x$  – коэффициент аэродинамического сопротивления,  $\rho$  – плотность воздуха, зависящая от высоты,  $V$  – скорость полета,

$S$  – характерная площадь летательного аппарата (в данной задаче площадь мишени ракеты) применялась с допущениями:  $c_x = \text{const}$ , плотность воздуха аппроксимировалась экспоненциальной зависимостью по высоте  $\rho = a_1 \cdot e^{-a_2 h}$ . Положительные коэффициенты  $a_1, a_2$ , вероятно, были подобраны методом наименьших квадратов. Из экспериментальных данных известно, что коэффициент аэродинамического сопротивления сильно зависит от числа Маха полета (рис. 1 из [3]), а кривая плотности, рассчитанная в соответствии с [4], не очень точно аппроксимируется экспоненциальной зависимостью (рис. 2).

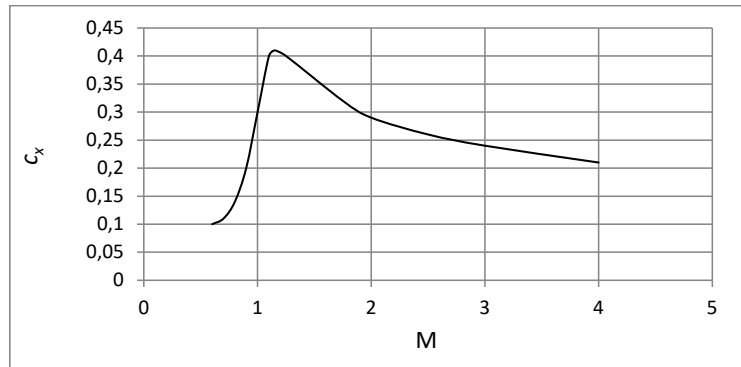


Рис. 1. Коэффициент аэродинамического сопротивления ракеты при угле атаки равном нулю в зависимости от числа Маха

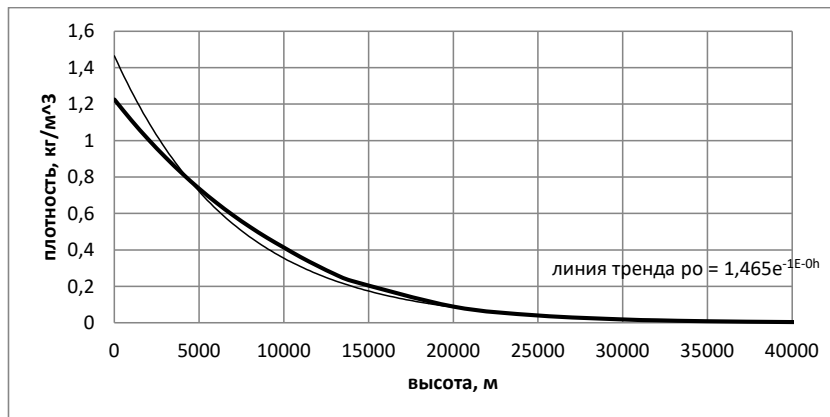


Рис. 2. Аппроксимация плотности воздуха по высоте экспоненциальной зависимостью

В работе [2] также принималось постоянство коэффициента аэродинамического сопротивления.

Качественное решение задачи ОУ выглядит следующим образом: в начале взлета двигатель должен работать на максимальном режиме, далее следует участок особого режима управления с пониженной тягой, по окончании топлива – движение по инерции до некоторой высоты.

Цель исследования: провести численный эксперимент для метеорологической ракеты типа МР20 с уточнением математической модели для аэродинамического сопротивления в соответствии с [3] и [4], по полученным количественным результатам расчетов провести анализ целесообразности применения особого режима управления.

**Математические модели и численные методы**

При заданном весовом балансе ракеты будем максимизировать высоту подъема ракеты.

$$J = h_{\text{подъема}} \rightarrow \max \text{ или}$$

$$\text{интегральный критерий } J = -\int_0^T V dt \rightarrow \min$$

Система уравнений движения при вертикальном подъеме ракеты-зонда:

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = V \\ \frac{dV}{dt} = \frac{\beta u - X_{\text{аэп}}}{m} - g \\ \frac{dm}{dt} = -G_T = -u \end{cases}$$

где  $h$  – высота, м;  $V$  – скорость, м/с;  $P = \beta u$  – тяга двигателя, Н;  $\beta$  – импульс РДГТ, м/с;  $u = G_T$  – управление, расход топлива, кг/с;  $X_{\text{аэп}}$  – сила аэродинамического сопротивления, Н;  $m$  – масса ракеты, кг;  $t$  – время, с;

$$g = 9,81 \frac{R^2}{(R+h)^2} \text{ – ускорение свободного}$$

падения, м/с<sup>2</sup>,  $R$  – радиус Земли. В качестве

исходных данных были приняты технические характеристики метеорологической ракеты МР-20: калибр  $d_{max} = 450$  мм, взлетная масса  $m_0 = 1620$  кг, импульс двигателя  $\beta = 2011$  м/сек считался постоянным, максимальный расход топлива  $u = G_T = 50,54$  кг/сек, масса топлива 1200 кг.

При использовании принципа максимума Понтрягина функция Понтрягина имеет вид

$$H = \psi_h V + \psi_V \left( \frac{\beta u - X_{asp}}{m} - g \right) + \psi_m (-u) + V =$$

$$= \psi_h V + \psi_V \left( -\frac{X_{asp}}{m} - g \right) + V + u \left( \psi_V \frac{\beta u}{m} - \psi_m \right).$$

$\psi_h, \psi_V, \psi_m$  – сопряженные переменные.

Функция линейна по управлению, коэффициент при управлении – функция переключения

$$\Phi_{nep} = \psi_V \frac{\beta u}{m} - \psi_m.$$

Оптимальное управление в этом случае

$$u^* = \begin{cases} u_{max} & \text{при } \Phi_{nep} > 0 \\ 0 & \text{при } \Phi_{nep} < 0 \\ u \in [0, u_{max}] & \text{при } \Phi_{nep} = 0 \quad \forall t \in [t_1, t_2] \subset [0, T] \end{cases}$$

Последний случай относится как раз к особому режиму управления. Исследованиям управления с особым режимом посвящены такие работы, как [5, 6, 7]. В этом случае должно выполняться на  $[t_1, t_2]$

$$\frac{d\Phi}{dt} = 0, \quad \frac{d^2\Phi}{dt^2} = 0.$$

Вначале был рассмотрен случай без особого режима управления, решение краевой задачи для системы ДУ

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = V \\ \frac{dV}{dt} = \frac{\beta u^* - X_{asp}}{m} - g \\ \frac{dm}{dt} = -G_T = -u^* \\ \frac{d\psi_h}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial h} \\ \frac{d\psi_V}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial V} \\ \frac{d\psi_m}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial m} \end{cases}$$

с краевыми условиями:

$$h(0) = 0, \quad V(0) = 0, \quad m(0) = m_0 = 1620 \text{ кг},$$

$$V(T) = 0, \quad m(T) = m_0 - m_{топл} = 420 \text{ кг}, \quad \psi_h(T) = 0$$

было получено методом пристрелки. Метод пристрелки или стрельбы дает наиболее точные результаты численного решения краевых задач [1, 8]. Производные функции Понтрягина по сопряженным переменным вычислялись с учетом того, что плотность воздуха, скорость звука и, соответственно, число Маха полета, а следовательно, и коэффициент аэродинамического сопротивления являются функциями высоты. Коэффициент аэродинамического сопротивления является также еще и функцией скорости полета. Внешний цикл – модифицированный метод Ньютона обращался к численному методу решения задачи Коши – методу Рунге – Кутты 4-го порядка. Для сходимости метода Ньютона момент отключения двигателя по израсходованию запаса топлива уточнялся линейной интерполяцией массы ракеты на шаге метода Рунге – Кутты, на котором заканчивалось топливо. После чего этот шаг пересчитывался с тягой двигателя, равной среднеинтегральному значению по указанному промежутку времени. Алгоритм пересчета был предложен для задач оптимального управления с переключением в [1], также применяя этот алгоритм, удалось достичь сходимости метода Ньютона в задачах с переключением в [9] и [10].

Параметры пристрелки и невязки для этого варианта расчета выбирались следующие:

$$\psi_h(0), \psi_V(0), \psi_m(0), T,$$

$$\delta_1 = V(T) \rightarrow 0, \quad \delta_2 = \psi_h(T) \rightarrow 0,$$

$$\delta_3 = H(T) \rightarrow 0, \quad \delta_4 = \Phi_{nep}(t_{nep}) \rightarrow 0.$$

Полученные результаты не соответствовали теории: функция Понтрягина не была равна нулю на всем протяжении, функция переключения меняла знак дважды, причем в точке переключения меняла знак с минуса на плюс, а не наоборот. Таким образом, вывод о неоптимальности управления без особого режима подтвердился. При этом при обнулении силы аэродинамического сопротивления в математической модели функция переключения и функция Понтрягина вели себя согласно теории: функция Понтрягина была равна нулю с точностью до 4-го знака, функция переключения меняла знак один раз с плюса на минус именно в момент отключения двигателя в связи с израсходованием всего топлива.



Попытка реализовать алгоритм метода пристрелки для варианта с особым режимом управления при получении оптимального управления на особом режиме из равенства  $\frac{d^2\Phi}{dt^2} = 0$  (полное выражение

слишком громоздко и в силу этого не приводится) не увенчалась успехом. Оптимальное управление на особом режиме зависит от сопряженных переменных, которые являются параметрами пристрелки в начальный момент времени, и в процессе поиска решения методом Ньютона при неточно выбранном начальном приближении получаемые значения управления на особом режиме не удовлетворяют ограничениям:  $u \in [0, u_{max}]$ .

В силу указанных причин было принято решение отказаться от решения задачи методом пристрелки и реализовать более простой алгоритм с использованием результатов, полученных в предыдущих работах [1] (рис. 3), а именно, постоянства тяги на особом режиме управления.

Алгоритм расчета с двумя переключениями состоял в следующем: первый вызов метода Рунге–Кутты при максимальном значении тяги ограничивался временем  $t_1$ , далее осуществлялся второй вызов метода Рунге–Кутты с пониженной тягой двигателя  $u = \bar{u}_{opt} \cdot u_{max}$ , третий вызов при отключенном двигателе ограничивался достижением

нулевой скорости полета. Были рассчитаны варианты при значениях  $t_1 = 3, 5, 7, 9, 11$  секунд. Для каждого из этих вариантов времени также варьировалась величина коэффициента уменьшения тяги  $\bar{u}_{opt} = 0,35; 0,45; 0,55; 0,65; 0,75, 0,85$ .

Таким образом, было получено решение для 30 вариантов управления тягой (+1 расчет без особого режима с временем работы двигателя около 24 с).

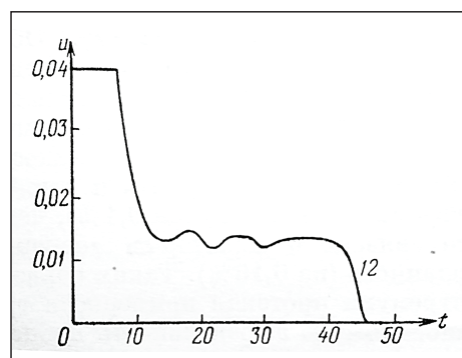


Рис. 3. 12-я итерация решения задачи о вертикальном подъеме ракеты-зонда методом проекции градиента [1]

### Результаты расчетов

Результаты численного эксперимента для оптимального управления с участком особого режима представлены на рис. 4 и 5.

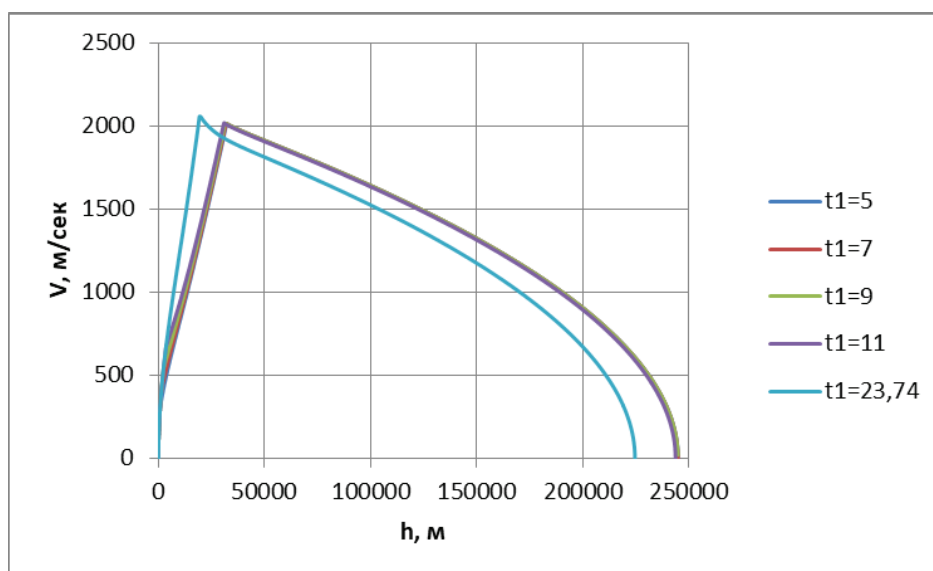


Рис. 4. Изменение скорости по высоте для  $\bar{u}_{opt} = 0,55$  при разных значениях времени работы двигателя на максимальном режиме  $t_1$ . Значение  $t_1 = 23,74$  с соответствует варианту без особого режима

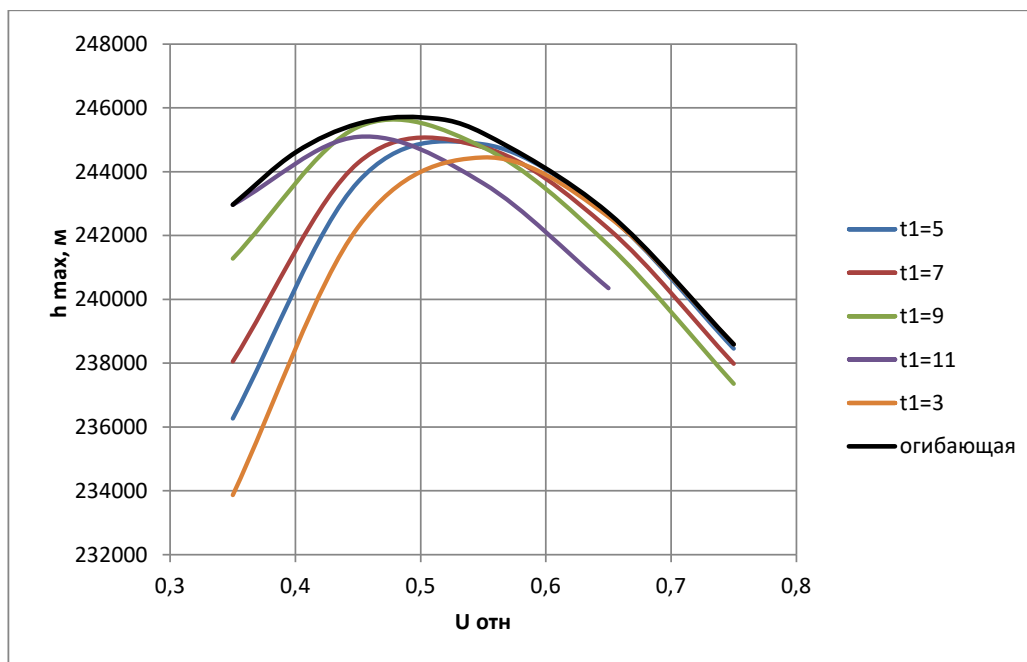


Рис. 5. Достижимая высота при различных вариантах регулирования двигателя

### Заключение

Наличие особого режима управления связано с аэродинамическим сопротивлением воздуха, слишком быстрый набор скорости в плотных слоях атмосферы приводит к большим энергетическим потерям.

Численный метод пристрелки в промежуточных приближениях не дает возможности определения тяги на особом режиме в заданном диапазоне, что приводит к выводу о нецелесообразности применения этого метода для решения задач с переключением и наличием участка особого управления.

При работе на максимальном режиме около 8 с и дальнейшем уменьшении тяги двигателя до 50 % от максимального значения можно увеличить высоту подъема данной ракеты на 25 км, что составляет около 11 % от высоты, достигаемой без применения особого режима управления. Учитывая эти результаты, можно сделать вывод о незначительном увеличении эффективности с применением особого управления при решении подобных задач. С учетом необходимости создания твердотопливного реактивного двигателя с регулируемой тягой для реализации управления с особым режимом целесообразность применения особого режима становится спорной.

### Список литературы

1. Федоренко Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления. М: Наука, 1978. 486 с.
2. Данг Нгок Тхань. Разработка вариационного метода и его компьютерного алгоритма оптимизации проектных решений геофизической исследовательской ракеты: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02 Моск. гос. авиац. ин-т. Москва, 2005. 27 с.
3. Пегов В.И., Киселев В.И. Аналитическое представление аэродинамических характеристик летательных аппаратов сложной формы // Наука ЮУрГУ: материалы 66-й научной конференции секции технических наук. 2014. С. 1728–1739.
4. ГОСТ 4401-81 Группа Т27 межгосударственный стандарт атмосфера стандартная. М.: Стандартгиз, 1949.
5. Молоденков А.В., Сапунков Я.Г. Особые режимы управления в задаче оптимального разворота космического аппарата и их приложения // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Общая и прикладная механика. 2011. № 4 (2). С. 237–238.
6. Хорошавин В.С., Зотов А.В. Особое оптимальное управление нелинейными объектами. Киров: Вятский государственный университет, 2019. 208 с.
7. Хорошавин В.С., Груднин В.С. Оптимальное программное движение с изменяемым временем регулирования // Радиопромышленность. 2020. Т. 30. № 3. С. 40–49. DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-3-40-49.
8. Афанасьева М.Н., Кузнецов Е.Б. Численный метод решения нелинейной краевой задачи для дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом // Труды МАИ. Выпуск № 88. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, 2016.
9. Мозжорина Т.Ю. Численное решение задач оптимального управления с переключением методом пристрелки // Математическое моделирование и численные методы. 2017. № 2 (14). С. 94–106.
10. Мозжорина Т.Ю., Осипов В.В. Численное решение задачи о мягком приземлении методом пристрелки // Инновационное развитие. 2018. № 8 (25). С. 11–15.

УДК 678

## РАЗРАБОТКА ТЕРМОСТОЙКОГО ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ

Павлычева Е.А.

*ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»,  
Владимир, e-mail: pavlychevaliza@mail.ru*

В данной работе рассматриваются результаты экспериментальных исследований по разработке термостойкого полимерного композиционного материала теплоизоляционного назначения, в котором связующее было получено при использовании 10%-ного раствора поликарбосилана в ксилоле, в качестве наполнителей применялись полые корундовые или полые алюмосиликатные микросферы с дополнительным введением кварцевых волокон в качестве упрочняющей добавки. По результатам экспериментов выявлено, что у образцов полимерного композиционного материала, содержащего в качестве наполнителя полые корундовые микросферы, эксплуатационные характеристики выше, чем у образцов, содержащих полые алюмосиликатные микросферы. Установлено, что при содержании 20–70 мас. % полимерного связующего, 15–65 мас. % корундовых полых микросфер и 10–45 мас. % кварцевых волокон разработанный композиционный материал характеризуется низкими значениями теплопроводности и плотности, высокой прочностью на сжатие, в том числе после воздействия температур до 700 °С в воздушной среде в течение не менее 10 ч. Таким образом, разработанный полимерный композиционный материал может эффективно применяться для термостойкой технической теплоизоляции поверхностей, которые в процессе эксплуатации нагреваются до 700 °С, в различных отраслях промышленности.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, теплоизоляционные пеноматериалы, поликарбосилан, полые корундовые микросферы, полые алюмосиликатные микросферы, кварцевые волокна

## DEVELOPMENT OF HEAT-RESISTANT POLYMER COMPOSITE MATERIAL FOR TECHNICAL THERMAL INSULATION

Pavlycheva E.A.

*Vladimir State University of a name of Alexander Grigorevich and Nikolay Grigorevich Stoletovs,  
Vladimir, e-mail: pavlychevaliza@mail.ru*

The paper considers the results of experimental studies on the development of a heat-resistant polymer composite material for thermal insulation purposes, in which the binding was obtained by using a 10% solution of polycarbosilane in xylene, hollow corundum or hollow aluminosilicate microspheres were used as fillers with the addition of quartz fibers as a strengthening additive. According to the results of experiments, it was revealed that the performance characteristics of samples of a polymer composite material containing hollow corundum microspheres as a filler are higher than those of samples containing hollow aluminosilicate microspheres. It was found that at a content of 20-70 wt. % poly-dimensional binder, 15-65 wt. % of corundum hollow microspheres and 10-45 wt. % of quartz fibers the developed composite material is characterized by low values of thermal conductivity and density, high compressive strength, including after exposure to temperatures up to 700 °C in the air for at least 10 hours. Thus, the developed polymer composite material can be effectively used for heat-resistant technical thermal insulation of surfaces that are heated up to 700 °C during operation in various industries.

**Keywords:** polymer composite materials, heat-insulating foams, polycarbosilane, hollow corundum microspheres, hollow aluminosilicate microspheres, quartz fibers

В настоящее время широкое распространение получили полимерные композиционные материалы, состоящие из полимерной основы (матрицы) и различных наполнителей. Данная разновидность композиционных материалов отличается большим разнообразием по составу, структуре и свойствам, характеризуется сочетанием высокой прочности, легкости, химической стойкости, низким водопоглощением, высокими диэлектрическими характеристиками и другими эксплуатационными показате-

лями, что является причиной их широкого применения во многих областях человеческой деятельности [1–3]. Путем комбинирования связующих и наполнителей из различных материалов, а также за счет изменения соотношений между ними можно получать композиционные материалы с широким диапазоном значений основных эксплуатационных свойств.

Одной из сфер применения полимерных композиционных материалов является строительная и техническая те-

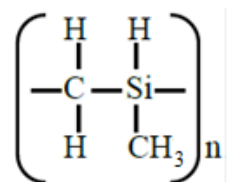
плоизоляция. Низкая теплопроводность полимерных композиционных материалов обеспечивается наличием в их структуре пор или элементов, образующих пустоты (сотовых каркасов или микросфер), а также за счет различных наполнителей [4, 5]. Одной из разновидностей теплоизоляционных полимерных композиционных материалов являются синтактные материалы, в которых наполнителем являются полые микросферы из различных материалов [4, 6, 7]. При этом в зависимости от нормативных требований и условий применения синтактного материала для его получения могут использоваться различные полимерные связующие [7–9]. Полые микросферы в составе синтактных материалов не только снижают теплопроводность, что позволяет использовать их для строительной и технической теплоизоляции, но и уменьшают плотность материала и изделий, получаемых из него [3, 5, 10]. Для улучшения прочности, адгезии и других эксплуатационных характеристик синтактного материала в его состав могут вводиться минеральные наполнители в виде порошков или волокон, а также различные функциональные добавки: стабилизаторы, пластификаторы и т.д. [8, 11, 12].

В случае применения в условиях высоких температур, важное значение имеет термостойкость синтактного материала, которая во многом определяется связующим. Наиболее распространенными термостойкими связующими являются полиорганосилоксаны, однако изделия на их основе можно длительно использовать при температурах, не превышающих 250 °С, так как при более высоких температурах прочность материалов на основе полиорганосилоксанов снижается, а при температурах свыше 300 °С кроме термоокислительной деструкции протекает еще и термическая деструкция [13, 14]. В результате деструкции синтактный материал необратимо теряет свои эксплуатационные свойства.

Целью данной работы является разработка полимерной композиции для получения термостойкого до 700 °С композиционного материала для технической теплоизоляции на основе кремнийорганического связующего, наполненного полыми микросферами.

## Материалы и методы исследования

В данной работе основу полимерной матрицы составлял 10%-ный раствор поликарбосилана в ксилоле. Кремнийорганическое связующее готовилось путем растворения порошка поликарбосилана с молекулярной массой 2500–3500 в ксилоле. Структурная формула звена поликарбосилана представлена на рисунке [15].



где  $n$  – количество карбосилановых групп.

### Структурная формула линейного звена поликарбосилана

В зависимости от метода получения в структуре поликарбосилана наряду с линейными звеньями могут присутствовать кольцевые и разветвленные звенья, для которых характерно наличие большого количества активных боковых и перекрестных связей [15].

Для наполнения полимерного связующего в данной работе рассматривалось два варианта микросфер: полые корундовые (ПКМ) и полые алюмосиликатные микросферы (ПАСМ), характеристики которых представлены в табл. 1.

Применяемые в данной работе ПКМ представляли собой инертные сферические частицы, полученные путем раздува струи расплава оксида алюминия. Содержание примесей в ПКМ (в мас. %): 0,5 SiO<sub>2</sub>; 0,05 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,3 Na<sub>2</sub>O. Наряду с ПКМ в данной работе применяли ПАСМ, получаемые при сгорании топлива на тепловых электростанциях, где зола от сгорания угля удаляется в виде водной пульпы. ПАСМ образуются в результате грануляции расплава минеральной части углей, которая при дроблении образует мелкие капли, раздувающиеся под действием газовых включений. Химический состав ПАСМ (в мас. %): 59–65 SiO<sub>2</sub>; 18–37 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; оксиды K, Na Fe, Ca, Mn, Mg, Ti, Cr – остальное.

Таблица 1

Основные характеристики полых микросфер

Микросферы	Средний размер, мкм	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Температура эксплуатации, °С
ПКМ	30–60	0,29–0,40	0,05–0,15	до 1800
ПАСМ	60–90	0,32–0,45	0,12–0,23	до 1400

В качестве волокнистого минерального наполнителя в данной работе использовались кварцевые волокна (КВ) с содержанием 99,9 мас. % SiO<sub>2</sub>, длиной 50–500 мкм и диаметром 1–2 мкм. Температура плавления кварцевых волокон составляет 1750 °С, плотность равна 2,2 г/см<sup>3</sup>, а модуль упругости равен 80 ГПа. Кварцевые волокна использовались как прочностная термостойкая армирующая добавка, что является важным при разработке термостойкого пеноматериала.

Полимерную композицию для получения термостойкого материала готовили путем предварительного приготовления 10%-ного раствора поликарбосилана в ксилоле, в который затем добавляли полые микросферы и кварцевые волокна, перемешивая компоненты до однородной смеси

при температуре 100–130 °С для удаления растворителя. Затем полимерные композиции разливали по формам, которые нагревали в печи в инертной атмосфере азота до 1000 °С при скорости нагрева 100 °С/час.

У полученных образцов разрабатываемого материала определяли кажущуюся плотность по ГОСТ 409-2017, предел прочности на сжатие по ГОСТ Р 58527-2019 и теплопроводность по ГОСТ 23630.2-79.

### Результаты исследования и их обсуждение

Образцы при выполнении данной работы изготавливались в соответствии с составами композиций, представленными в табл. 2.

У полученных образцов были определены основные характеристики, значения которых представлены в табл. 3.

**Таблица 2**

Составы композиций для получения образцов разрабатываемого материала

№ образца	Состав композиции, мас. %			
	10%-ный раствор поликарбосилана в ксилоле	ПКМ	ПАСМ	КВ
1	20	65	–	15
2	40	15	–	45
3	70	20	–	10
4	10	70	–	20
5	80	15	–	5
6	20	–	65	15
7	40	–	15	45
8	70	–	20	10
9	10	–	70	20
10	80	–	15	5

**Таблица 3**

Основные характеристики образцов разрабатываемого материала

№ образца	Кажущаяся плотность кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность при 250 °С, Вт/м·°С	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности при сжатии после 10 ч при 700 °С на воздухе, МПа	Визуальный контроль
1	275	0,09	6,1	5,1	–
2	304	0,17	6,6	6,1	–
3	280	0,22	8,4	7,6	–
4	–	–	–	–	Деформация
5	–	–	–	–	Деформация
6	290	0,11	5,4	4,7	–
7	346	0,17	5,6	5,1	–
8	308	0,25	7,2	6,8	–
9	–	–	–	–	Деформация
10	–	–	–	–	Деформация

Таблица 4

Основные свойства известного и разработанного термостойких композиционных теплоизоляционных материалов

Показатель	Композиционный материал	
	Известный	Разработанный
Теплопроводность при 250 °С, Вт/м·°С	0,12–0,23	0,09–0,22
Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup>	242–395	275–304
Предел прочности при сжатии, МПа	4,9–6,1	6,1–8,4
Предел прочности при сжатии после 10 ч при 700 °С на воздухе, МПа	4,2–7,3	5,1–7,6

Как следует из полученных данных, при использовании от 20 до 70 мас. % связующего и от 15 до 70 мас. % микросфер могут быть получены полимерные композиционные материалы с высокой прочностью, низкой насыпной плотностью и низкой теплопроводностью. При этом термостойкость и прочность материала подтверждаются прочностью на сжатие образцов после 10 ч при 700 °С на воздухе и обеспечиваются всеми компонентами материала. Так, для поликарбосилана, как и для других кремнийорганических соединений, характерно наличие силоксановой связи Si-O с высокой энергией связи, что и обеспечивает не только термостойкость, но также химическую стойкость, прочность и хорошие диэлектрические свойства. В случае термической деструкции поликарбосилана и при отрыве углеводородных групп возникают новые поперечные связи между макромолекулами, поэтому полимерная цепочка не распадается, а термостойкость и основные свойства связующего сохраняются [15].

Кварцевые волокна выполняют функцию основной армирующей добавки, повышающей прочность, и наряду с микросферами состоят преимущественно из термостойких и тугоплавких материалов: оксидов кремния и алюминия. Следует отметить, что полые микросферы также повышают прочность материала, и наиболее высокие прочностные показатели наблюдаются при совместном использовании полых микросфер и волокон. Кроме того, замена части кварцевых волокон полыми микросферами способствует снижению вязкости полимерной композиции.

Из табл. 3 также следует, что у композиционного материала, наполненного ПКМ, рассматриваемые показатели выше, чем у материала, наполненного ПАСМ. Образцы, полученные с использованием ПКМ, отличаются более низкой плотностью и более низкой теплопроводностью, а также превосходят образцы, полученные

с использованием ПАСМ, по прочности, в том числе после выдержки в течение 10 ч при 700 °С на воздухе, что свидетельствует об их более высокой термостойкости.

На основании полученных данных было принято решение выбрать в качестве итогового состава композицию, состоящую из 20–70 мас. % раствора поликарбосилана в ксилоле, 15–65 мас. % ПКМ и 10–45 мас. % кварцевых волокон. Свойства материала на основе выбранного состава были оценены в сравнении с известным термостойким пеноматериалом, который может быть получен на основе композиции, содержащей 15–70 мас. % раствора поликарбосилана в ксилоле с аналогичной данной работе концентрацией поликарбосилана (10%), 12–65 мас. % полых углеродных микросфер и 8–43 мас. % кварцевых волокон [15]. Свойства известного и разработанного композиционных материалов представлены в табл. 4.

При сравнении значений свойств из табл. 4 видно, что разработанный материал превосходит известный полиорганосилоксановый пеноматериал по прочности, в том числе по прочности после воздействия высоких температур, и теплоизоляционным характеристикам, а также сравним с ним по плотности.

### Заключение

По итогам выполнения данной работы был получен полимерный композиционный материал на основе кремнийорганического связующего, наполненного микросферами для снижения теплопроводности и кварцевыми волокнами для повышения прочности. При этом все компоненты сырьевой смеси способствуют получению термостойкого материала. В результате сравнительных экспериментов установлено, что при использовании полых корундовых микросфер эксплуатационные свойства материала выше, чем при использовании полых алюмосиликатных микросфер. При сравнении полученного материала со сходным с ним

по составу и области применения материалом выявлено, что разработанный материал превосходит известный по прочности при обычных условиях и после выдержки в течение 10 ч при 700 °С на воздухе. В связи с этим разработанный материал может эффективно применяться в качестве термостойкого композиционного материала для технической теплоизоляции поверхностей, которые в процессе эксплуатации нагреваются до 700 °С.

### Список литературы

1. Павлычева Е.А., Пикалов Е.С. Современные энергоэффективные конструкционные и облицовочные материалы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 7. С. 76–87.
2. Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г. Разработка способа получения облицовочного композиционного материала на основе полимерных и стеклянных отходов // Экология промышленного производства. 2018. № 3. С. 2–6.
3. Павлычева Е.А. Разработка теплоизоляционного полимерного покрытия, наполненного фенолформальдегидными микросферами // Инженерный вестник Дона. 2020. № 5. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2020/6497> (дата обращения: 15.06.2021).
4. Колосова А.С., Пикалов Е.С. Современные газонаполненные полимерные материалы и изделия // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 10. С. 54–67.
5. Колосова А.С., Пикалов Е.С. Современные эффективные теплоизоляционные материалы на органической основе // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 4. С. 74–85.
6. Волков Д.П., Заричняк Ю.П., Марова А.А. Структура и теплопроводность многокомпонентных полимерком-  
позитов, наполненных керамическими и силиконовыми полыми микросферами // Пластические массы. 2016. № 5–6. С. 38–41.
7. Sun G., Yang L., Liu R. Thermal insulation coatings based on microporous particles from Pickering emulsion polymerization. *Progress in Organic Coatings*. 2021. Vol. 151. Article 106023.
8. Чухланов В.Ю., Селиванов О.Г. Диэлектрические свойства герметизирующей композиции на основе эпокси-диановой смолы, модифицированной полиметилфенилсилоксаном, в сантиметровом СВЧ-диапазоне // Клеи. Герметики. Технологии. 2015. № 3. С. 6–10.
9. Торлова А.С., Виткалова И.А., Пикалов Е.С. Технологии производства, свойства и области применения композиций на основе фенолформальдегидных смол // Научное обозрение. Технические науки. 2017. № 2. С. 96–114.
10. Song X., Xiao W., Wang P., Liao B., Yan K., Zhang J. Hollow glass microspheres-based ultralight non-combustible thermal insulation foam with point-to-point binding structure using solvent evaporation method. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 292. Article 123415.
11. Tao Y., Mao Z., Yang Z., Zhang J. Preparation and characterization of polymer matrix passive cooling materials with thermal insulation and solar reflection properties based on porous structure. *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 225. Article 110361.
12. Xu J., Hong C., Geng J., Jin X., Pan Y., Wang H., Luo X., Zhang X. Facile synthesis, mechanical toughening, low thermal conductivity and fire-retardant of lightweight quartz fiber reinforced polymer nanocomposites. *Composites Science and Technology*. 2021. Vol. 211. Article 108836.
13. Селиванов О.Г., Михайлов В.А. Теплоизоляционные синтактовые материалы на основе термостойкого кремнийорганического полимера // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 7. С. 12–13.
14. Брык М.Т. Деструкция наполненных полимеров. М.: Химия, 1989. 192 с.
15. Ильина М.Е., Курочкин И.Н. Разработка термостойкого теплоизоляционного пеноматериала // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 10–1. С. 26–30.

УДК 621.78.011:621.81

## МЕТОДЫ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ОБЪЕМНОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

**Шматов А.А.***Белорусский национальный технический университет, Минск, e-mail: shmatovalexander@gmail.com*

Настоящая статья посвящена обзору методов термоциклической обработки (ТЦО), получивших применение для упрочнения во всем объеме стальных инструментов. В результате анализа литературных данных установлено, что многократные полиморфные превращения в стали при ТЦО приводят к фазовому наклепу, измельчению микро- и субзеренной структуры, увеличению плотности дислокаций и дефектов кристаллического строения. Такая структура создает преимущественно деформационное (дислокационное) упрочнение во всем объеме стальной матрицы. По назначению все процессы ТЦО делятся на две основные группы: 1) предварительная ТЦО для улучшения структуры перед термической и механической обработкой; 2) упрочняющая ТЦО (УТЦО), формирующая структуру закаленной стали с окончательными рабочими свойствами. В работе предложена новая классификация известных способов УТЦО по различным видам термоциклического упрочнения быстрорежущих и штамповых сталей. УТЦО может проходить с фазовыми или без фазовых превращений, с завершенными или незавершенными структурно-фазовыми превращениями при циклическом нагреве и охлаждении, осуществляться по диффузионному, сдвиговому или смешанному механизмам фазовой перекристаллизации, самостоятельно или вместе с другими видами воздействий. Процессы УТЦО являются наиболее эффективными и экономичными способами повышения стойкости режущих и штамповых металлообрабатывающих инструментов.

**Ключевые слова:** объемное упрочнение, термоциклическая обработка, стальные инструменты

## THERMOCYCLIC TREATMENT METHODS FOR VOLUME STRENGTHENING STEEL TOOLS

**Shmatov A.A.***Belarusian National Technical University, Minsk, e-mail: shmatovalexander@gmail.com*

This article is devoted to a review of the methods of thermocyclic treatment (TCT), which have received application for strengthening in the entire volume of steel tools. As a result of the analysis of the literature data, it was found that multiple polymorphic transformations in steel during TCT lead to phase hardening, refinement of the micro- and subgrain structure, and an increase in the density of dislocations and crystal defects. This structure creates predominantly deformation (dislocation) hardening in the entire volume of the steel matrix. All TCT processes are divided into two main application groups: 1) preliminary TCT to improve the structure before thermal and mechanical treatment; 2) strengthening TCT (STCT), which forms the structure of hardened steel with final working properties. A new classification of the known STCT methods on various types of thermocyclic strengthening of high-speed and die steels is proposed in the paper. STCT can take place with or without phase transformations, with completed or incomplete structural and phase transformations during cyclic heating and cooling, carried out by diffusion, shear or mixed mechanisms of phase recrystallization, alone or together with other types of influences. STCT processes are the most effective and economical methods to increase the service life of cutting and stamping metalworking tools.

**Keywords:** volumetric strengthening, thermocyclic treatment, steel tools

Поверхностная обработка не всегда может повысить работоспособность стальных инструментов, которые испытывают большие динамические нагрузки; в этом случае требуются высокие показатели прочности и трещиностойкости во всем объеме инструментов. В настоящее время самыми эффективными и экономичными способами объемного упрочнения считаются процессы термоциклической обработки (ТЦО), которые улучшают свойства сталей и сплавов за счет «постоянного накопления от цикла к циклу положительных изменений структуры» [1]. В отличие от традиционной термообработки при ТЦО появляются новые источники, оказывающие влияние на изменение структуры сплавов, прежде всего фазовые превращения, температурные градиенты, структурные и термические напряжения [1–3]. Процессы ТЦО имеют много общего с процессами пластической

деформации, в обоих случаях можно создать деформационное (дислокационное) упрочнение. Большое влияние на формирование дислокационной структуры оказывают многократно повторяющиеся фазовые превращения сплавов; они приводят к фазовому наклепу, созданному из-за разницы удельных объемов и модулей упругости образующихся фаз. Фазовый наклеп сопровождается процессами рекристаллизации, что ведет к измельчению всех структурных составляющих. С другой стороны, с увеличением числа циклов проявляется эффект структурной наследственности, направленный на восстановление исходного состояния и снижение деформационного упрочнения. Как отмечено в работах [3–5], при ТЦО сплавов происходят следующие структурные изменения:

1. Диспергирование элементов микро- и субмикроструктуры, сфероидизация



хрупких избыточных фаз (карбидов) и других структурных составляющих. Процессу диспергирования способствуют процессы пластической деформации и рекристаллизации, проходящие при ТЦО. Важнейшим рычагом дробления кристаллов является трещинообразование в хрупких избыточных фазах. В местах выхода дислокаций и субзеренных границ преимущественно растворяются избыточные фазы; нерастворившиеся фазы являются подложкой для повторного выделения этих фаз из пересыщенного твердого раствора. Явление сфероидизации идет наряду с коагуляцией избыточных фаз за счет внутризеренной и зернограничной диффузии.

2. Увеличение плотности точечных и линейных дефектов кристаллической структуры. Высокая концентрация точечных дефектов интенсифицирует диффузионные процессы, что приводит к обогащению твердого раствора легирующими элементами, повышению химической однородности сплава. Избыток вакансий ускоряет распад пересыщенного твердого раствора. При высокой плотности дислокаций на границах зерен, субзерен и первичных фаз со скоплениями вакансий создается деформационное упрочнение сплавов в результате формирования полей структурных и термических напряжений.

3. Немонотонность изменения свойств сплавов в зависимости от числа циклов, вызванная конкуренцией двух факторов, формирующих определенный тип структуры. Усиление деформационной компоненты сопровождается повышением количества различных дефектов кристаллического строения (вакансий, дислокаций); напротив, на стадии формирования субструктуры, особенно при фрагментации, плотность дислокаций снижается.

По назначению все процессы ТЦО сталей и сплавов можно условно разде-

лить на две основные группы: 1) предварительная ТЦО для улучшения структуры перед термической и механической обработкой [1, 6, 7]; 2) упрочняющая ТЦО (УТЦО), формирующая структуру закаленной стали с окончательными рабочими свойствами [8]. Согласно классификации В.К. Федюкина [2] процессы ТЦО имеют много разновидностей (рис. 1, 2).

ТЦО может проходить с фазовыми или без фазовых превращений, с завершенными или незавершенными структурно-фазовыми превращениями при циклическом нагреве и охлаждении, осуществляться по диффузионному, сдвиговому или смешанному механизмам фазовой перекристаллизации, отдельно или в сочетании с другими видами воздействий (рис. 1), а сами процессы выполняют по схемам маятниковой, средне-, высоко- и низкотемпературной ТЦО (рис. 2). Маятниковая ТЦО представляет собой циклический печной нагрев до температуры на 30–50 °С выше точки  $A_{c1}$  с последующим охлаждением на воздухе до температуры на 50–80 °С ниже  $A_{r1}$ . При среднетемпературной ТЦО проводят циклический нагрев до температуры на 30–50 °С выше  $A_{c1}$  с последующим охлаждением на воздухе до температуры на 50–80 °С ниже  $A_{r1}$  и затем охлаждением в воде или масле. Высокотемпературную ТЦО осуществляют путем циклического электронагрева сталей со скоростью 30–50 °С/с до температуры полной аустенизации и быстрого охлаждения до температуры наименьшей устойчивости аустенита (420–450 °С) и выдержки при ней до полного его превращения, а на последнем цикле осуществляют закалку на мартенсит. При низкотемпературной ТЦО проводят многократный нагрев на 30–50 °С ниже точки  $A_{c1}$  с последующим охлаждением в воде (масле). Эти процессы ТЦО практически не применяют для инструментальных сталей [1].



Рис. 1. Классификация видов ТЦО [1]

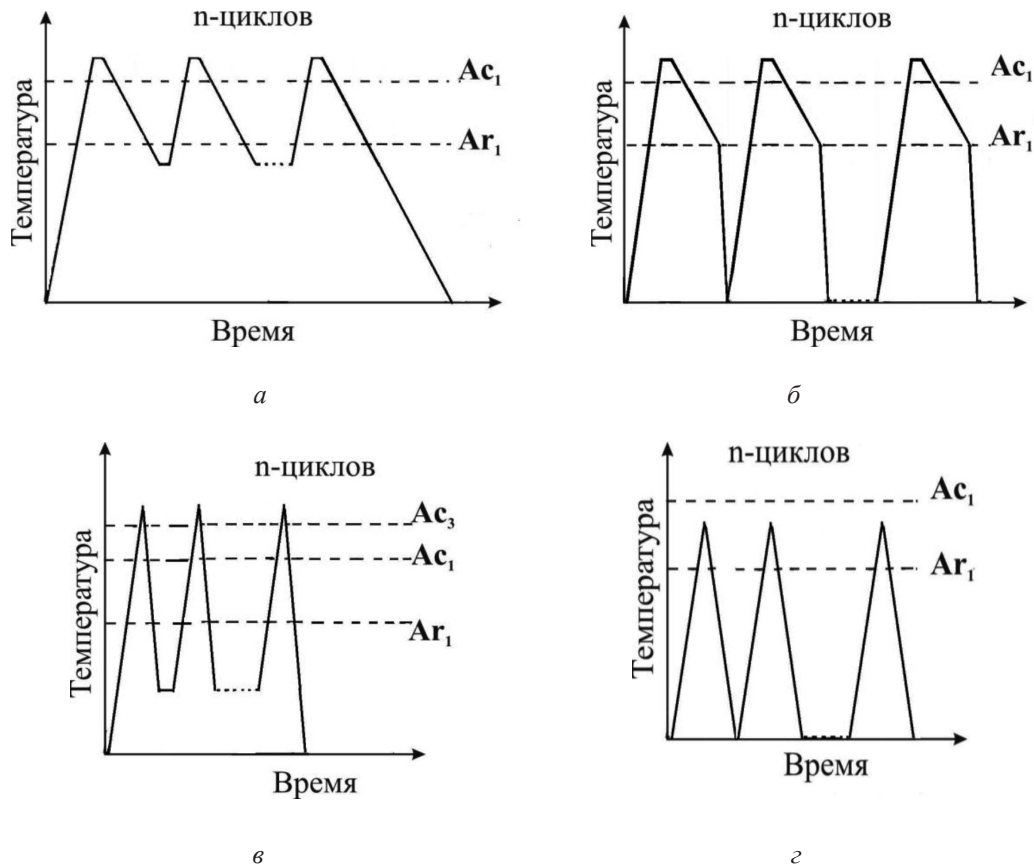


Рис. 2. Схемы ТЦО сталей и сплавов [1]: а – маятниковая ТЦО, б – среднетемпературная ТЦО, в – высокотемпературная ТЦО, г – низкотемпературная ТЦО

По мнению зарубежных и отечественных ученых процессы УТЦО являются наиболее эффективными способами термоциклической обработки, повышающей стойкость инструментов [8–10]. Изученные в настоящей работе процессы УТЦО режущих и штамповых металлообрабатывающих инструментов имеют много вариантов, которые отличаются от стандартной термообработки (закалки и отпуска) термоциклическими режимами и последовательностью выполнения операций [11–13].

По технологическому признаку все известные процессы УТЦО (табл. 1) можно условно разделить на три основные группы [8], в которых: 1) термоциклирование предшествует окончательной термической обработке, причем термоциклирование можно совмещать или не совмещать с закалкой; 2) термоциклирование осуществляют после окончательной термической обработки; 3) термоциклирование следует за пластической деформацией и окончательной термической обработкой. В табл. 1 термин «термоциклирование» представляет собой любое много-

кратное чередование операций нагрева и охлаждения. В этом случае процессы многократной закалки, отжига, нормализации и другие термоциклические режимы в сочетании с термообработкой (закалкой и отпуском) можно полноправно отнести к УТЦО, формирующей структуру с окончательными рабочими свойствами инструментов. При этом словосочетание «термоциклирование, совмещенное с закалкой», означает, что с верхней температуры последнего термоцикла осуществляют закалочное охлаждение, а выражение «термоциклический отжиг с промежуточным перлитным превращением» означает, что на последнем цикле осуществляют медленное охлаждение до комнатной температуры. В изученных процессах УТЦО термоциклирование инструментальных сталей может проходить с завершенными превращениями или при отсутствии таковых, а промежуточные фазовые превращения при циклическом охлаждении могут протекать по мартенситному, перлитному или бейнитному механизмам [8, 14].

Таблица 1

Известные способы УТЦО инструментальных сталей [8]

Технологические операции
1. Термоциклирование с промежуточным перлитным превращением, совмещенное с закалкой на бейнит + отпуск
2. Термоциклирование с промежуточным бейнитным превращением, совмещенное с закалкой на бейнитно-мартенситную структуру + отпуск
3. Многократная закалка на мартенсит + отпуск
4. Термоциклирование с промежуточным мартенситным превращением, совмещенное с закалкой на мартенсит + отпуск
5. Многократная закалка на мартенсит с промежуточным отпуском + отпуск
6. Многократная закалка на мартенсит с промежуточным многократным нагревом ниже $A_1$ с последующим резким охлаждением + отпуск
7. Термоциклический отжиг с промежуточным перлитным превращением + закалка на мартенсит + отпуск
8. Многократный отжиг + закалка на мартенсит + отпуск
9. Многократная нормализация + закалка на мартенсит + отпуск
10. Термоциклирование с промежуточным перлитным превращением, совмещенное с закалкой на мартенсит + отпуск
11. Термоциклирование с бейнитным превращением, совмещенное с закалкой на мартенсит + отпуск
12. Термоциклирование вокруг точки $A_1$ без распада аустенита при охлаждении, совмещенное с закалкой на мартенсит + отпуск
13. Термоциклирование выше $A_1$ , совмещенное с закалкой на мартенсит + отпуск
14. Многократный нагрев ниже $A_1$ с последующим резким охлаждением + закалка на мартенсит + отпуск
15. Закалка на мартенсит + отпуск + многократный нагрев ниже $A_1$ с последующим резким охлаждением
16. Пластическая деформация + закалка на мартенсит + отпуск + многократный нагрев ниже $A_1$ с последующим резким охлаждением

Таблица 2

Результаты изучения инструментальных сталей после УТЦО [9]

Структура	Свойства
на основе отпущенного мартенсита или бейнита	физико-химические, механические, технологические
Увеличение плотности дислокаций	Повышение ударной вязкости
Снижение степени тетрагональности мартенсита	Повышение прочности (при изгибе, растяжении)
Повышение напряжений 2-го рода	Повышение твердости
Измельчение зерен и субзерен	Повышение износостойкости
Уменьшение блоков мозаики	Увеличение теплостойкости и термостойкости
Уменьшение размера карбидов	Повышение коррозионной стойкости
Увеличение количества вторичных дисперсных карбидов	Повышение контактной выносливости
Повышение степени легирования и однородности твердого раствора	Увеличение периода стойкости инструмента
Устранение структурной полосчатости	Снижение температур критических точек
	Повышение изотропности свойств
	Уменьшение деформации
	Устранение закалочных микротрещин

Анализ (табл. 2) показал, что инструментальные стали упрочняют не всеми известными способами УТЦО: быстрорежущие стали – способами под номерами 3, 5, 7, 13, 14; а штамповые стали – практически всеми, кроме 13 и 14. Для быстрорежущих сталей наилучшим по достигаемому эффекту является процесс УТЦО, включающий 5–7 циклов многократного нагрева до полной их аустенизации при температуре на 20–50 °С ниже температуры плавления

и термоциклического охлаждения с выдержкой при 800–850 °С (выше точки  $A_1$ ), закалку, совмещенную с последним термоциклическим нагревом, и трехкратный отпуск (560 °С по 1 ч). Для ударно-штамповых сталей (У8–У12) наилучшим является способ УТЦО, включающий термоциклирование (пять циклов) в интервале температур от 740 до 800 °С с изотермическими выдержками при этих температурах для полного завершения фазовых пре-

вращений сталей, закалочное охлаждение в воде с верхней температуры термоцикла и низкий отпуск при 180°C. Однако подавляющее большинство известных процессов УТЦО инструментальных сталей имеет такой недостаток, что каждый цикл УТЦО проводят с полностью завершёнными структурно-фазовыми превращениями для измельчения и гомогенизации структуры во всем объеме инструмента. Это не позволяет сформировать наиболее работоспособную структуру инструментальной стали с градиентом химического состава и свойств по сечению инструмента, когда на его поверхности создаются более высокие показатели твердости и износостойкости, а в сердцевине инструмента – более высокие значения вязкости и прочности.

В результате применения УТЦО инструментальных сталей (табл. 2) существенно улучшается микро- и макроструктура инструментальных сталей, что положительно сказывается на увеличении целого комплекса важных эксплуатационных и технологических характеристик металлообрабатывающих инструментов [15–17].

### Заключение

Поверхностная обработка не всегда может повысить работоспособность стальных инструментов, которые испытывают большие динамические нагрузки; поэтому так важно развивать технологии объемного упрочнения, чтобы обеспечить высокие показатели прочности и трещиностойкости во всем объеме инструментов. В этом плане большой интерес представляет метод термоциклической обработки, который создает деформационное (дислокационное) упрочнение в инструментальных сталях, приводит к их фазовому наклепу, диспергированию элементов микро- и субзеренной структуры. Среди известных технологий термоциклической обработки наиболее перспективным считается процесс упрочняющей термоциклической обработки, формирующей мелкоизмельченную структуру закаленной стали с окончательными рабочими свойствами высокого уровня. Благодаря своей простоте, технологичности и эффективности использование данной технологии упрочняющей термоциклической обработки на практике позволит решить важнейшую проблему повышения работоспособности стальных металлообрабатывающих инструментов.

### Список литературы

1. Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. Л.: Машиностроение, 1989. 255 с.

2. Лыгденов Б.Д., Хараев Ю.П., Грешилов А.Д., Гурьев А.М. Термоциклирование. Структура и свойства. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. 251 с.

3. Гурьев А.М. Экономно-легированные стали для литых штампов горячего деформирования и их термоциклическая и химико-термоциклическая обработка: дис. ... докт. техн. наук: 05.16.01. Томск, 2001. 487 с.

4. Ткаченко Г.А. Конструкционная прочность и структурообразование углеродистых сталей при термоциклической обработке // Респ. Межведом. сб. науч. тр. Metallurgia / БНТУ. 2011. Вып. 33. Ч. 2. С. 119–133.

5. Югай С.С., Закирова М.Г., Абляз Т.Р. Диспергирование низкоуглеродистой мартенситной стали методом интенсивной термоциклической обработки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4. С. 1347–1350.

6. Пантелеев И.А. Разработка режимов термоциклического отжига заготовок из быстрорежущих сталей с целью улучшения технологической пластичности: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.09. Москва, 2011. 136 с.

7. Косихина М.С. Эффективность термоциклической обработки шарикоподшипниковых сталей // Всероссийская научно-техническая конференция Студенческая научная весна 2014: Машиностроительные технологии [Электронный ресурс]. URL: <http://studvesna.qform3d.ru> (дата обращения: 24.06.2021).

8. Шматов А.А. Научные и технологические основы термомеханических и термоциклических методов упрочняющей обработки металлообрабатывающих инструментов: дис. ... докт. техн. наук: 05.16.01 и 05.02.07. Минск, 2020. 344 с.

9. Норхужаев Ф.Р., Эргашев Д.М. Термоциклическая обработка нетеплостойких инструментальных сталей // Universum: технические науки: электрон. Научн. журн. 2020. № 11 (80). [Электронный ресурс]. URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/10923> (дата обращения: 24.06.2021).

10. Иващенко В.Ю., Чейлях А.П. Использование термоциклирования для обработки штампов // Вістник Приазовського державного технічного університету. 2011. Вып. 22. № 3. С. 108–112.

11. Мордасов Д.М., Зотов С.В. Термоциклическая обработка штампов для работы в условиях горячего деформирования из стали X12MФ // Вестник ТГТУ. 2016. Т. 22. № 3. С. 481–490.

12. Борисова С.А., Комарова Т.В. Термоциклическая обработка инструментальной стали У12 // Материаловедение и металлургия Нижегород. гос. техн. ун-та. 2005. Т. 50. С. 245–247.

13. Шматов А.А. Способ термической обработки режущего инструмента из быстрорежущей стали // Патент РФ № 2563382. Патентообладатель Шматов А.А. 2015. Бюл. № 26.

14. Шматов А.А., Жилинский О.В., Фомихина И.В., Лактюшина Т.В., Марочкина С.И. Проектирование процесса термоциклической обработки стали Р6М5 с помощью компьютерных синтез-технологий // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В. 2009. № 8. С. 19–25.

15. Власова О.А. Повышение эксплуатационных свойств инструментальных сталей методами термоциклической обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. Барнаул, 2009. 186 с.

16. Свеклин А.П., Горщикова Т.А., Хлыбов А.А. Термоциклическая обработка как метод повышения механических свойств инструментальных сталей // Sword: технические науки [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sword.com.ua/index.php/ru/conference/the-content-of-conferences/archives-of-individual-conferences/june-2014> (дата обращения: 24.06.2021).

17. Братухин А.В. Повышение износостойкости инструментальных сталей при изготовлении авиационного крепежа с использованием лазерного термического упрочнения: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01. Нижний Новгород, 2020. 132 с.

СТАТЬИ

УДК 535.41:778.38

**ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ  
В ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

**Алымкулов С.А., Исманов Ю.Х., Жумалиев К.М.**

*Институт физики им. академика Ж.Ж. Жээнбаева НАН Кыргызской Республики,  
Бишкек, e-mail: i\_yusupjan@mail.ru*

В статье проведена оценка потерь пространственной информации в системе с голографической записью с учетом как пространственно-частотной, так и апертурной характеристик. Показано, что возможные потери информации в обобщенной голографической системе, если рассматривать ее как устройство для передачи пространственной информации, можно объяснить с помощью нескольких причин. Среди них самыми важными являются факторы, определяющие изменение значения величины параметра сигнал/шум при переходе от одного участка голографической системы к другому или при переходе от одного диапазона частот к другому. Общие потери проявляются не только в виде уменьшения полного объема передаваемой информации, но и в виде уменьшения ее плотности. Для проведения анализа голографической системы она рассматривалась как многоступенчатая структура, каждая ступень которой дает определенный вклад в потери информации, проходящей сквозь систему. На первой ступени информация может вводиться либо дискретным образом, в виде отдельных пикселей, либо аналоговым образом, в виде непрерывного изображения. И в первом, и во втором случаях возникают ограничения при вводе, обусловленные апертурой системы. Вторая ступень – это система линз, осуществляющих преобразование Фурье. Здесь также присутствуют потери информации, обусловленные такими факторами, как слабое пропускание линзами высоких пространственных частот и ограниченность апертур линз. Третий этап – это запись прошедшей сквозь голографическую систему пространственной информации на носитель. Данный процесс сопровождается дополнительными шумами, которые необходимо учитывать.

**Ключевые слова:** многоступенчатая голографическая система, пространственно-частотная характеристика, апертурная характеристика, линза, преобразование Фурье, информационная пропускная способность

**FEATURES OF SPATIAL INFORMATION TRANSMISSION IN HOLOGRAPHIC SYSTEMS**

**Alymkulov S.A., Ismanov Yu.Kh., Zhumaliev K.M.**

*Institute of Physics named after academician Z.Z. Zheenbaev of the National Academy  
of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, e-mail: i\_yusupjan@mail.ru*

The article evaluates the loss of spatial information in a system with holographic recording, taking into account both spatial-frequency and aperture characteristics. It is shown that the possible loss of information in a generalized holographic system, if we consider it as a device for transmitting spatial information, can be explained by several reasons. Among them, the most important are the factors that determine the change in the value of the signal-to-noise parameter during the transition from one part of the holographic system to another or during the transition from one frequency range to another. General losses are manifested not only in the form of a decrease in the total volume of transmitted information, but also in the form of a decrease in its density. For the analysis of the holographic system, it was considered as a multi-stage structure, each stage of which makes a certain contribution to the loss of information passing through the system. In the first stage, information can be entered either discretely, in the form of individual pixels, or analogously, in the form of a continuous image. In both the first and second cases, there are input restrictions due to the system aperture. The second stage is a Fourier transform lens system. There is also a loss of information due to factors such as poor transmission of high spatial frequencies by the lenses and limited lens apertures. The third stage is the recording of the spatial information passed through the holographic system onto the carrier. This process is accompanied by additional noise that must be taken into account.

**Keywords:** multi-block holographic system, spatial frequency response, aperture response, lens, Fourier transform, information bandwidth

Голографическую запись можно охарактеризовать особенной, присущей только ей передачей информации в области пространственного спектра частот. На общий объем информации, переносимой голографической системой, влияют множество факторов, характерных именно для голографического процесса. К этим факторам можно в первую очередь отнести факторы, влияющие на полосу пропускания пространственных частот, среди которых можно выделить апертурные входной и выходной

частей оптической системы, т.е. апертурные линз, используемых для образования картин интерференции, ширины записывающего и опорного пучков, апертурные линз, используемых для восстановления голограммы, размер голограммы или ее отдельной страницы. В цифровом случае это еще и размеры фотоматрицы, которая записывает оцифрованную голограмму. К факторам, влияющим на итоговый размер записанной информации, относятся также и размеры самого объекта, характеристи-

ки полученной голограммы в области пространственных частот и, что очень важно учитывать, характеристики записывающей фотоматрицы [1–3].

Как уже упоминалось выше, при рассмотрении голографической системы необходимо учитывать не только параметры системы в области пространственных частот, но и параметры апертур всех элементов оптической системы, которые задаются в этом случае с помощью координат сигнала, представленного в оптическом виде. Можно это также сделать, задав параметры в виде значений отношения сигнал/шум или степени квантования оптического сигнала [4–6]. Важность рассмотрения апертурной характеристики при учете потерь информации в пространственной области заключается в том, что запись голограммы – это процесс преобразования координатной информации в информацию в области пространственных частот. То есть и в этом случае мы можем оценивать именно потери в области пространственных частот [7–9].

Целью данной работы является общий анализ голографических систем с точки зрения их возможностей по передаче информации в области пространственных частот, влияние на эту возможность пропускаемой системой пространственных частот и координатно-апертурных характеристик оптической системы.

#### *Возможные потери информации при передаче ее в голографической системе*

Возможные потери информации в обобщенной голографической системе, если рассматривать ее как устройство для передачи пространственной информации, можно объяснить с помощью нескольких причин. Среди них самыми важными являются факторы, определяющие изменение значения величины параметра сигнал/шум при переходе от одного участка голографической системы к другому или при переходе от одного диапазона частот к другому. Чаще всего значительные потери в системе происходят при переходе от низких частот к более высоким частотам. Общие потери проявляются не только в виде уменьшения полного объема передаваемой информации, но и в виде уменьшения ее плотности.

Учет всех упомянутых факторов позволяет провести анализ возможных потерь информации в голографической системе.

Если разбить голографическую систему, в соответствии с типом обработки изображения, на ступени, то способность пропускать данные для отдельного этапа можно задать следующим соотношением

$$I_i = N_i \log_2(m_i + 1).$$

где  $i$  – номер этапа,  $N_i$  – количество пикселей числового разбиения изображения, проходящее сквозь апертуру  $i$ -го этапа,  $m_i$  – число уровней квантования для каждого пикселя при условии, что количество пикселей попадающих в апертуру  $i$ -го этапа равно  $N_i$  [10–12]. При условии, что число пикселей, приходящихся на единицу площади апертуры  $i$ -го этапа, равно  $N'_i$ , а апертурная площадь равна  $s_i$ , можем записать

$$I_i = N'_i s_i \log_2(m_i + 1). \quad (1)$$

Особенностью любого этапа является то, что рост частоты пространственного спектра приводит к уменьшению значения  $m_i$ . Если принять во внимание тот факт, что голографическая запись на тонкослойных записывающих средах приводит к различным информационным плотностям в двух взаимно перпендикулярных направлениях, то возникает необходимость рассматривать по отдельности частотные спектры вдоль этих направлений. В этом случае  $m_i(v_x, v_y)$  можно представить в виде

$$m_i(v_x, v_y) = m_{0i} \delta_i(v_x) \delta_i(v_y). \quad (2)$$

где  $\delta_i(v_x) = m(v_x) / m_0$  – нормированная величина, получающаяся в результате разделения переменных. Значение этой величины может быть меньше или равно единице (здесь  $m_0$  – наибольшее значение  $m$  при некоторых усредненных значениях частот). Рассмотрим оптимизацию этапа голографической системы. Следствием оптимизации этапа голографической системы является необходимость деления апертуры этого этапа на такое число пикселей  $N$ , при котором частота  $v$  пространственного спектра задает величину  $m(v)$  так, чтобы общее количество информации, пропускаемое системой, стало максимально большим [13–15].

В апертуру голографической системы вдоль одной координаты укладывается  $2N'_x$  пикселей, что соответствует теореме отсчетов Шеннона. Отсюда следует, что общий объем информации, пропускаемый  $i$ -м этапом системы, можно представить в виде

$$I_i = N'_{xi} N'_{yi} s_i \log_2[m_{0i} \delta_i(2N'_x) \delta_i(2N'_y) + 1] \quad (3)$$

или

$$I_i = 4v_{x\max} v_{y\max} \log_2[m_{0i} \delta_i(v_{x\max}) \delta_i(v_{y\max}) + 1]. \quad (4)$$

В качестве критерия при выборе общего числа пикселей в голографической системе надо брать не только число пикселей для самой малой апертуры на одном из этапов системы, но и тот факт, что от этапа к этапу в системе происходит уменьшение значения величины сигнал/шум. Важным моментом

является отладка голографической системы с целью согласованной работы всех этапов системы, так как в противном случае происходят дополнительные потери информации при прохождении системы. Функциональная зависимость величины сигнал/шум при росте частот по отношению к нулевым и слабым частотам на  $i$ -м этапе голографической системы задается величинами  $\delta_i(v_{xi})$  и  $\delta_i(v_{yi})$ . Величина сигнал/шум изменяется также и в поперечных оптической оси системы направлениях – вдоль осей  $x_i$  и  $y_i$ . Это происходит в случае неравномерности сигнала в поперечном направлении. Зависимость значения сигнал/шум от координат в этом случае определяется величинами  $\beta_i(x_i)$  и  $\beta_i(y_i)$ . Значения  $\delta_i(v_{xi})$ ,  $\delta_i(v_{yi})$  и  $\beta_i(x_i)$ ,  $\beta_i(y_i)$  определяются в основном величинами сигнал/шум  $\Psi$ . Запишем значение сигнал/шум для заключительного этапа голографической системы в следующем виде (5):

$$\Psi_{\text{вых}}(v_{xn}, x_n) = \xi_1 \xi_2 \dots \xi_n \delta_1(v_{x1}) \delta_2(v_{x2}) \dots \delta_n(v_{xn}) \beta_1(x_1) \beta_2(x_2) \dots \beta_n(x_n). \quad (5)$$

сделать оценку плотности и общего объема пропускаемой голографической системой информации.

В голографической системе присутствуют три этапа, влияние которых максимально на ее информационную пропускающую способность. На первом этапе происходит считывание информации, вводимой в голографическую систему. На втором этапе происходит преобразование вводимой информации – в нашем случае это преобразование Фурье, которое осуществляется либо отдельной линзой, либо системой линз, входящих в голографическую систему. На данном этапе происходит формирование картины интерференции за счет сложения преобразованного объектного луча и опорной волны. Третий этап – это процесс записи полученной интерференционной картины на цифровой или аналоговый носитель.

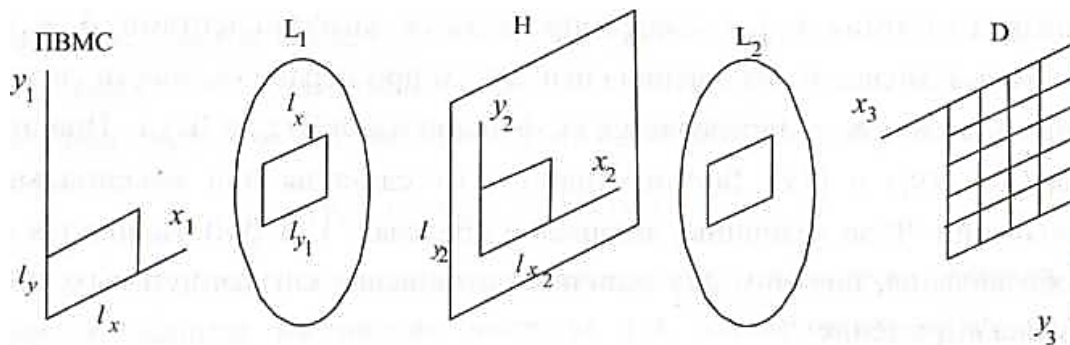


Рис. 1. Основные этапы голографической системы, влияющие на возможные потери информации: ПВМС – пространственно-временной модулятор света;  $L_1, L_2$  – линзы, образующие этап преобразования объектной волны при записи и восстановлении голограммы;  $H$  – голограмма;  $D$  – фотоматрица

В соотношении (5) подразумевается, что функция  $\Psi(v_x, v_y, x, y)$  разделяется на независимые переменные. Значения  $\xi$  характеризуют изменчивость величины сигнал/шум при переходе от одного этапа голографической системы к другому.

Анализ показывает, что на каждом этапе голографической системы частота, при которой пропуск информации максимален, больше, чем для всей голографической системы. То есть общий объем информации, пропускаемый системой, меньше, чем объем, пропускаемый на каждом этапе.

Проанализируем, как происходит изменение величины сигнал/шум на этапах голографической системы, которая показана на рис. 1. Это, в свою очередь, позволит

На первом этапе информация может вводиться либо дискретным образом, в виде отдельных пикселей, либо аналоговым образом, в виде непрерывного изображения. И в первом, и во втором случаях возникают ограничения при вводе, обусловленные апертурой системы.

Дискретный ввод информации в голографическую систему изначально ограничивает общий объем информации самим процессом дискретизации – определяется шаг дискретизации, задаются максимальные значения пространственных частот  $v_{x \max}$  и  $v_{y \max}$ , фиксируются размеры страниц для вводимой информации  $l_x$  и  $l_y$ . Все это приводит к тому, что информация в процессе ввода передается

полностью или частично теряется. Если потерь нет, то

$$I = 4 l_{x \max} l_{y \max} v_{x \max} v_{y \max}. \quad (6)$$

В аналоговом случае дискретизация, тем не менее, осуществляется на выходе голографической системы в момент считывания фотоматрицей, причем на шаг дискретизации сильно влияют возможные потери информации на этапах голографической системы. Объем информации, пропускаемый голографической системой, в этом случае равен (7):

$$I = 4 l_{x \max} l_{y \max} v_{x \max} v_{y \max} \log_2 [m_0 \delta(v_{x \max}) \delta(v_{y \max}) + 1].$$

На этапе ввода информации в голографическую систему формируется транспарант, зависящий от пространственной частоты. Эта зависимость задается переменными  $\delta(1/\alpha_1 v_x)$  и  $\delta(1/\alpha_1 v_y)$ . Зависимость от координат можно приближенно задать с помощью величин  $\beta_1(\alpha_1 x) = \beta_1(\alpha_1 y) = 1$ . Эти зависимости определены до границ страниц ввода информации  $x = l_{x \max}$  и  $y = l_{y \max}$ . Вне этих границ  $\beta(x) = \beta(y) = 0$ . Для данного этапа  $\xi_1 < 1$ .

Второй этап – это обычно либо отдельная линза, либо система линз, осуществляющих преобразование Фурье. Потери на этом этапе малы, поэтому  $\xi_2 \approx 1$ . Тем не менее и на этом этапе присутствуют небольшие потери информации, обусловленные такими факторами, как слабое пропускание линзами высоких пространственных частот, ограниченность апертур линз. Этих ограничений при построении голографических систем необходимо избегать. С этой целью надо использовать линзы с низкими значениями аберрации и большой апертурой, что позволит избежать потерь высокочастотных составляющих изображений. Принимая во внимание тот факт, что в целом голографическая система осуществляет преобразование Фурье, можно записать соотношения, связывающие координаты  $x_2$  и  $y_2$  на выходе голографической системы с амплитудными и фазовыми характеристиками пространственного спектра входного изображения, в виде  $v_{x2} = x_2 / \lambda f$  и  $v_{y2} = y_2 / \lambda f$ . Аналогичные соотношения можно записать для обратной последовательности  $v_{x1} = x_1 / \lambda f$  и  $v_{y1} = y_1 / \lambda f$ .

Третий этап – это этап записи прошедшей сквозь голографическую систему пространственной информации на цифровой или аналоговый носитель. Данный процесс сопровождается дополнительными шумами, величина которых задается неравенством  $\xi_3 < 1$ . Кроме того, в этом случае также присутствуют потери в частотной

области, величина которых определяется значениями  $\delta(v_{xout})$  и  $\delta(v_{yout})$ . Принимая сказанное во внимание, необходимо на выходе голографической системы учесть изменение как координатных характеристик, т.е.  $\beta_3 = (x / \lambda f)$  и  $\beta_3 = (y / \lambda f)$ , так и ограничения в области пространственных частот  $\delta_3(v_x)$ ,  $\delta_3(v_y)$  по плоскости голограммы ( $v_{x3} = l_{x2} / \lambda f$ ,  $v_{y3} = l_{y2} / \lambda f$ ). Необходимая информация считывается в пределах области, ограниченной координатами  $-l_x / 2$  и  $+l_x / 2$  вдоль оси  $x$  и  $y_H - l_y / 2$  и  $y_H + l_y / 2$  вдоль оси  $y$ . На рис. 2 представлены зависимости для  $\beta$  и  $\delta$  вдоль оси  $y$ .

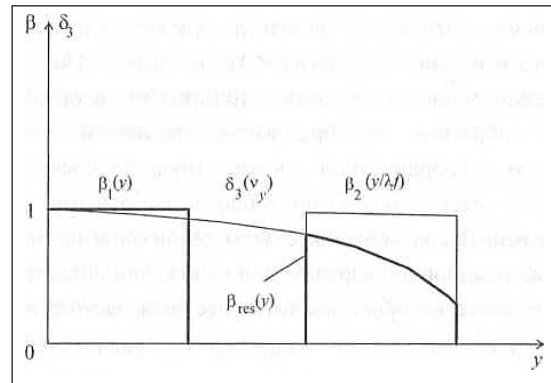


Рис. 2. Изменение величин  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\delta_3$  и  $\beta_{res}$  вдоль оси  $y$  выходной плоскости

На рис. 2 показано, что основной вклад в скорость изменения отношения сигнал/шум в выходной плоскости дает значение  $\delta_3$ , определяющее частотную характеристику голограммы.

### Заключение

Голографическая система рассмотрена как многоступенчатая структура, каждая ступень которой дает определенный вклад в потери информации, проходящей сквозь систему.

На первой ступени информация может вводиться либо дискретным образом, в виде отдельных пикселей, либо аналоговым образом, в виде непрерывного изображения. И в первом, и во втором случаях возникают ограничения при вводе, обусловленные апертурой системы. Показано, что для оптимизации системы, направленной на уменьшение потерь информации, максимальные пространственные частоты  $v_{x \max}$ ,  $v_{y \max}$ , а с ними и размер апертуры (страницы) должны быть оценены заранее.

Вторая ступень – это система линз, осуществляющих преобразование Фурье. Здесь также присутствуют потери информации, обусловленные такими факторами, как слабое пропускание линзами высоких



пространственных частот и ограниченность апертур линз. Для преодоления этих ограничений необходимо использовать линзы с низкими значениями аберрации и большой апертурой, что позволит избежать потерь высокочастотных составляющих изображений.

Третий этап – это этап записи, прошедшей сквозь голографическую систему пространственной информации на носитель. Данный процесс сопровождается дополнительными шумами, которые необходимо учитывать, подстраивая выход голографической системы на возможные изменения информации в координатной и частотной областях.

### Список литературы

1. Исманов Ю.Х. Интерферометрия на основе метода бесчелевой радужной голографии // Вестник КГУСТА. 2015. № 4 (40). С. 194–198.
2. Исманов Ю.Х., Джаманкызов Н.К., Тынышова Т.Д., Алымкулов С.А. Восстановление бесчелевой радужной голограммы когерентной волной: материалы VII Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. С. 596–597.
3. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д., Алымкулов С.А. Использование приближения Френеля для расчета распределения светового поля, прошедшего сквозь решетку // Вестник КГУСТА. 2017. № 3 (57). С. 171–178.
4. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д., Абдулаев А.А. Моделирование оптической системы, работающей при некогерентном освещении // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 3. С. 98–102.
5. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д. Уменьшение объема вводимых данных при компьютерной обработке интерферограмм: материалы VIII Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 695–696.
6. Yaroslavsky L. Introduction to Digital Holography. V. 1. Bentham E-book Series “Digital Signal Processing in Experimental Research”. 2010.
7. Nehmetallah G. and Banerjee P.P. Applications of digital and analog holography in three-dimensional imaging. *Advances in Optics and Photonics*. 2012. Vol. 4. Issue 4. P. 472–553. DOI: 10.1364/AOP.4.000472.
8. Seok H.J. and Sang K.G. Proposal for Optical One-time Password Authentication Using Digital Holography. *Journal of the Optical Society of Korea*. 2016. Vol. 20. Issue 6. P. 722–732.
9. Rivenson Y., Stern A. and Javidi B. Improved depth resolution by single-exposure in-line compressive holography. *Applied Optics*. 2013. Vol. 52. Issue 1. P. A223–A231. DOI: 10.1364/AO.52.00A223.
10. Xue K., Yun-Da Q.L. and Wang Q. Continuous-wave terahertz in-line digital holography. *Optics Letters*. 2012. Vol. 37. Issue 15. P. 3228–3230. DOI: 10.1364/OL.37.003228.
11. Gross M. Heterodyne holography with full control of both the signal and reference arms. *Applied Optics*. 2016. Vol. 55. Issue 3. P. A8–A16. DOI: 10.1364/AO.55.0000A8.
12. Jiang Z., Veetil S.P., Cheng J., Cheng L., Wang L. and Zhu J. High-resolution digital holography with the aid of coherent diffraction imaging. *Optics Express*. 2015. Vol. 23. Issue 16. P. 20916–20925. DOI: 10.1364/OE.23.020916.
13. Wang Z., Jiang Z., and Chen Y. Single-shot dual-wavelength phase reconstruction in off-axis digital holography with polarization-multiplexing transmission. *Applied Optics*. 2016. Vol. 55. Issue 22. P. 6072–6078. DOI: 10.1364/AO.55.006072.
14. Jeon P., Lee H., Kim J., Liu C., and Kim D. Analysis of three-dimensional mapping problems in incoherent digital holography. *Optics Express*. 2020. Vol. 28. Issue 4. P. 4501–4515. DOI: 10.1364/OE.384477.
15. Van Rooij J., Kalkman J. Sub-millimeter depth-resolved digital holography. *Applied Optics*. 2017. Vol. 56. Issue 25. P. 7286–7293. DOI: 10.1364/AO.56.007286.

УДК 547.466.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ СУПРАМОЛЕКУЛЯРНОГО КОМПЛЕКСА МОНОАММОНИЙНОЙ СОЛИ ГЛИЦИРРИЗИНОВОЙ КИСЛОТЫ (ГЛИЦИРАМА) С L-ГЛУТАМИНОВОЙ КИСЛОТОЙ

<sup>1</sup>Джуманазарова А.С., <sup>2</sup>Матаипова А.К., <sup>2</sup>Маметова А.С., <sup>2</sup>Абдуллаева Ж.Д.

<sup>1</sup>*Институт химии и фитотехнологий Национальной академии наук*

*Кыргызской Республики, Бишкек, e-mail: dzhumanazarova@gmail.com;*

<sup>2</sup>*Ошский государственный университет, Ош, e-mail: mataipova@list.ru, mametova10@mail.ru, jypar.science@oshsu.kg*

В последние три десятилетия большой интерес представляет синтез супрамолекулярных систем (СМС), которые образованы по принципу «хозяин – гость». Такие СМС обладают новыми свойствами, являются достаточно устойчивыми, но при определенных условиях способны распадаться на исходные вещества, при этом растворимость плохо растворимого компонента значительно повышается, обуславливая его большую биодоступность. Базовая биологическая активность в таких СМС не только сохраняется, но и усиливается. Одним из широко и успешно используемых комплексообразующих веществ является моноаммонийная соль глицирризиновой кислоты – глицирам (GC). Нами изучена СМС GC и L-глутаминовой кислоты (L-Glu), синтезированная в твердой фазе. Такая система представляет большой интерес с точки зрения биологической активности, поскольку исходные компоненты обладают уникальными активностями. GC обладает сильными противовоспалительными свойствами и проявляет активирующее влияние на функцию клеток кроветворного микроокружения. L-Glu является энергетическим материалом для ткани мозга и обладает хорошими нейропротекторными свойствами. L-Glu обладает низкой водной растворимостью, получение же СМС с GC способствует повышению ее растворимости. Синтезированная СМС GC с L-Glu изучена с помощью ИК-Фурье, УФ-спектроскопии и рентгенофазовым анализом. Выполненные биологические испытания СМС-препарата на крысах в условиях высокогорья показали хороший нейропротекторный эффект по сравнению с исходными компонентами.

**Ключевые слова:** супрамолекулярные системы, глицирам, L-глутаминовая кислота, нейропротекторная активность

## STUDY OF THE MONOAMMONIUM SALT SUPRAMOLECULAR COMPLEX OF GLYCYRRHIZIC ACID (GLYCYRAM) WITH L-GLUTAMIC ACID

<sup>1</sup>Dzhumanazora A.S., <sup>2</sup>Mataipova A.K., <sup>2</sup>Mametova A.S., <sup>2</sup>Abdullaeva Zh.D.

<sup>1</sup>*Institute of Chemistry and Phytotechnology of the National Academy of Sciences Kyrgyz Republic, Bishkek, e-mail: dzhumanazarova@gmail.com;*

<sup>2</sup>*Osh State University, Osh, e-mail: mataipova@list.ru, mametova10@mail.ru, jypar.science@oshsu.kg*

In the last three decades, the synthesis of supramolecular systems (SMS), which formed according to the «host-guest» principle, has been of great interest. Such SMS have new properties, are quite stable, but, under certain conditions, are capable of decomposing into the starting substances, while the solubility of the poorly soluble component increases significantly, causing its greater bioavailability. The basic biological activity in such SMS is not only preserved, but also enhanced. One of the widely and successfully used complexing agent is the monoammonium salt of glycyrrhizic acid – glycyram (GC). We have studied CMC GC and L-glutamic acid (L-Glu) synthesized in the solid phase. Such a system is of great interest from the point of view of biological activity, since the initial components have unique activities. GC has strong anti-inflammatory properties and has an activating effect on the function of cells in the hematopoietic microenvironment. L-Glu is an energetic material for brain tissue and has good neuroprotective properties. L-Glu has a low aqueous solubility, while the preparation of CMC with GC helps to increase its solubility. The synthesized SMS GC with L-Glu was studied using FTIR, UV spectroscopy and X-ray phase analysis. The performed biological tests of the CMC preparation on rats, in high altitude conditions, showed a good neuroprotective effect in comparison with the initial components.

**Keywords:** supramolecular systems, glycyram, L-glutamic acid, neuroprotective activity

Синтез супрамолекулярных систем (СМС) на основе глицирама (GC) и аминокислот является актуальным и перспективным подходом для получения препаратов с улучшенными и полезными свойствами [1–4]. В работе [5] указывается, что нет принципиальной разницы, когда СМС образует глицирризиновая кислота (GA) или ее моноаммонийная соль – глицирам (GC). По-

этому мы в равной степени рассматривали СМС обеих молекул. Сочетание GA и GC с различными аминокислотами дает препараты с очень полезными свойствами.

Так, показано [6], что комплекс GA и Arg обладает выраженным гепатопротекторным действием, и поэтому он входит в состав различных биологически активных композиций. Сочетание соли GA с аминокисло-

тами аргинином, орнитинном и гистидином оказывает более высокий лечебный эффект, чем свободная GA [7, 8].

В работе [9–11] изучена антиоксидантная активность GA и аминокислот: L-триптофана, L-метионина, L-цистеина, DL-карнитина, природных полифенолов и их СМС. Авторы отмечают, что СМС, полученные на основе GA, оказывали более эффективное антиоксидантное действие, чем отдельно взятые соединения.

Комплексообразование [12] обеспечивает защиту базового препарата от быстрого метаболизма в организме, улучшает его транспорт через биологические мембраны, позволяет пролонгировать эффект действующего вещества за счет повышения аффинности к рецептору органа-мишени.

Исследование супрамолекулярного комплекса между GC и L-Glu представляло интерес с нескольких точек зрения:

– СМС GC и Glu еще не изучена. Такие системы интересны с точки зрения природы сил, которые удерживают компоненты вместе, обуславливая изменения свойств исходных продуктов, главным образом повышая их растворимость в воде, следовательно, повышая биодоступность [13]. L-Glu, в отличие от большинства аминокислот, обладает плохой растворимостью в воде [12];

– представляет интерес синтез комплекса в твердой фазе, поскольку он имеет ряд преимуществ и является более перспективным для таких систем, чем синтез в жидкой фазе [14]. Кроме этого, основанием для выбора твердофазного синтеза послужило то, что в работе [5] с помощью рентгеноструктурного анализа изучено строение кристаллов GC. Авторы констатируют, что молекулы GC расположены относительно друг друга таким образом, что образуют каналы и полости, что, на наш взгляд благоприятствует внедрению в них фармаконов;

– СМС GC и L-Glu представляет интерес с биологической точки зрения. Известно, что L-Glu является энергетическим материалом для ткани мозга. Это связано с ее способностью окисляться в митохондриях через стадию образования кетоглутаровой кислоты с выходом энергии, запасаемой в виде АТФ. L-Glu обладает хорошими нейротропными свойствами.

Хорошо известно, что GC является сильным противовоспалительным средством. Кроме того, в работе [15] показано, что глицирам стимулирует восстановление как гранулоцитарного, так и эритроидного ростка костномозгового кроветворения. Стимулирующий эффект глицирама связан с его активирующим влиянием на функцию клеток кроветворного микроокружения.

Поэтому сочетание таких полезных свойств исходных соединений – GC и L-Glu в одной супрамолекулярной системе представляет значительный практический интерес.

Цель исследования супрамолекулярного комплекса моноаммонийной соли глицирризиновой кислоты (глицирама) с L-глутаминовой кислотой основывается на свойствах супрамолекулярных соединений, которые достаточно устойчивы, но при определенных условиях способны распадаться на исходные вещества, при этом растворимость плохо растворимого компонента значительно повышается, обуславливая его большую биодоступность.

### Материалы и методы исследования

*Твердофазный синтез.* Навеску GC и Glu брали в мольном соотношении 1:1. Механохимическую обработку проводили в планетарной мельнице РМ-200 (Retsch) в течение 3–5 мин.

ИК-спектры исходных соединений и комплекса сняты на ИК-Фурье-спектрометре Agilent Cary 600, прессованные в КВг.

УФ-спектры изучены на спектрофотометре ПЭ-5400. Приготовленные растворы GC и L-Glu, с концентрацией  $10^{-4}$  М, брали в соотношениях GC:L-Glu 1:9, 2:8, 3:7, 4:6, 5:5, 6:4, 7:3, 8:2, 9:1 при постоянном объеме. Смешивание водных растворов компонентов комплекса для съемки УФ-спектров производили на орбитальном мультишейкере Multi PSU-20 в течение 40 мин при комнатной температуре.

Рентгеновский порошковый дифракционный анализ используется для подтверждения физической фазы продукта. Рентгеноструктурные исследования проводились с использованием рентгеновского дифрактометра XPERT-PRO ( $\lambda = 1,541874 \text{ \AA}$ ). Образец порошка отсканирован в диапазоне 2 $\theta$  15–800 40kv/30mA, шаг 2 $\theta$  0,020 при комнатной температуре.

Испытания синтезированных комплексов на биологическую активность проведены на высокогорном полигоне Туя-Ашуу (3500 м, Кыргызстан) в условиях гипоксии [16].

Гипоксия представляет собой универсальный патологический процесс, сопровождающий и определяющий развитие различных патологий. Известно, что наиболее чувствительны к дефициту кислорода головной мозг, эндотелий сосудов, миокард, почки – т.е. ткани, менее приспособленные к анаэробному способу получения энергии.

Опыты проводились на половозрелых крысах-самцах весом 220–260 г в количестве 36 крыс. Эксперимент описан в работе [16].

## Результаты исследования и их обсуждение

### Анализ ИК-спектров

*ИК-спектр GC* (KBr,  $\nu$ ,  $\text{cm}^{-1}$ ): 3197 (OH, NH), 2837 (CH), 1717 (C=O), 1699,8 (C=O), 1647,7 ( $\text{C}_{11}=\text{O}$ , C=C), 1589 ( $\text{COO}^-$ ), 1456 ( $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}_3$ ), 1418 ( $\text{NH}_4^+$ ), 1387,6 (CH), 1362 (CH), 1212 (CH), 1165 (C-O-C, C-OH), 1040,6 (C-O-C, C-OH), 981 (=CH).

*ИК-спектр Glu* (KBr,  $\nu$ ,  $\text{cm}^{-1}$ ): 3064 ( $\text{NH}_3^+$ ), 2741 (OH, NH, CH), 1699 ( $\text{COOH}$  неионизованная), 1636 (аминокислотная полоса I,  $\text{NH}_3^+$ ), 1558,7 ( $\text{COO}^-$ ), 1506 (аминокислотная полоса II,  $\text{NH}_3^+$ ), 1419 ( $\text{COO}^-$ ), 1349,6 (CH), 1310 (CH), 1256 (CH), 1232 (CH), 1212 (CH), 1149 (CH), 1126 (CH), 1073 (C-O-C, C-OH), 1051 (C-O-C, C-OH), 945 (OH), 911 (OH).

*ИК-спектр комплекса GC:Glu (1:1)*, (KBr,  $\nu$ ,  $\text{cm}^{-1}$ ): 3051 (OH, NH), 1699 ( $\text{COOH}$ ), 1636,9 (аминокислотная полоса I), 1615 ( $\text{COO}^-$ ), 1516 (аминокислотная полоса II), 1420 ( $\text{COO}^-$ ), 1349 (CH), 1310 (CH), 1254 (CH), 1231 (CH), 1151 (CH), 1126 (CH), 1053 (C-O-C, C-OH), 946 (OH), 913 (OH).

Дикарбоновые моноаминокислоты, к которым относится L-Glu, содержат в своём составе протонированную аминогруппу, ионную форму карбоксила, участвующую в образовании цвиттер-ионной формы аминокислоты, а также недиссоциированную форму карбоксила.

Взаимодействие GC с Glu вызывает в ИК-спектрах сдвиги ряда полос поглощения. В образовании комплекса GC и L-Glu участвуют группы  $\text{COO}^-$  и  $\text{NH}_3^+$  аминокислоты, что подтверждается смещением аминокислотной полосы I на  $1 \text{ cm}^{-1}$ , амино-

кислотной полосы II на  $10 \text{ cm}^{-1}$  в длинноволновую область. При образовании комплекса GC и L-Glu в его ИК-спектре наблюдается уменьшение интенсивности частот поглощения симметрических валентных колебаний групп  $\text{COO}^-$ . Значительные изменения претерпевают валентные колебания  $\text{NH}_3^+$  аминокислоты: широкая полоса с вершиной в области  $3011,4 \text{ cm}^{-1}$  в аминокислоте смещается в область  $3051,4 \text{ cm}^{-1}$  в комплексе, что свидетельствует об образовании водородных связей. Неионизованные карбоксильные группы, как GC, так L-Glu, остаются без изменения, следовательно, они не принимают участия во взаимодействии. Значительные изменения претерпевают связи (C-O-C, C-OH) в GC – их интенсивность сильно уменьшается, следовательно, они также участвуют в образовании водородных связей с аминогруппой цвиттер-иона.

Такие изменения спектральных данных можно объяснить электростатическими взаимодействиями цвиттер-ионной формы аминокислоты с ионизованной карбоксильной группой, а также другими функциональными группами GC, содержащими атом кислорода [17].

### Анализ УФ-спектров

Из УФ-спектров изоляричных серий GC и L-Glu определено соотношение компонентов, при котором образуется комплекс. Состав комплекса определен методом изоляричных серий [18]. Изоляричные кривые, полученные для смесей GC:L-Glu, приведены на рис. 1 и 2. Наличие изобестической точки (рис. 1) свидетельствует об образовании только одного типа комплекса между веществами.

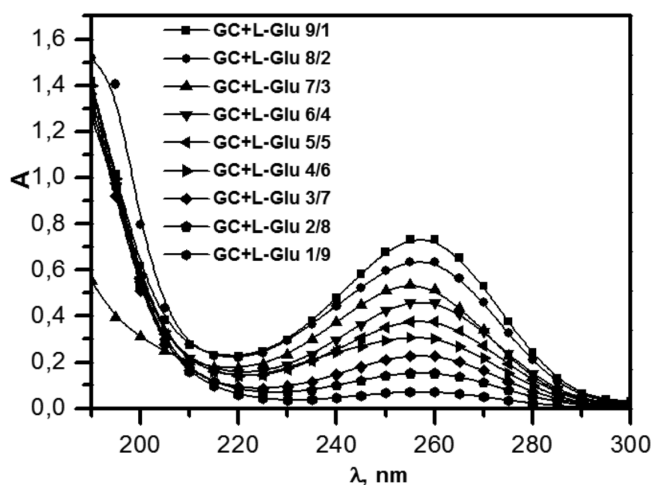


Рис. 1. УФ-спектры поглощения растворов GC и L-Glu в изоляричных соотношениях при pH 7,2

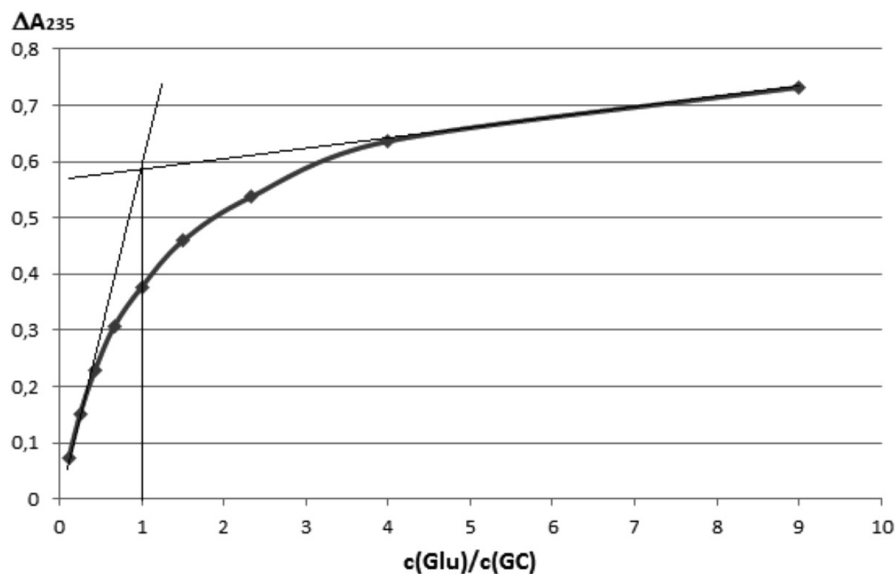


Рис. 2. Зависимость изменения оптической плотности  $\Delta A$  от соотношения компонентов изомолярной серии при  $\lambda = 235$  нм ( $c(\text{Glu}) = 10^{-4}\text{M}$ ,  $c(\text{GC}) = 10^{-4}\text{M}$ , pH 7,2)

Для компонентов комплексов получено молярное соотношение 1:1 (рис. 2).

*Анализ рентгенофазовых спектров*

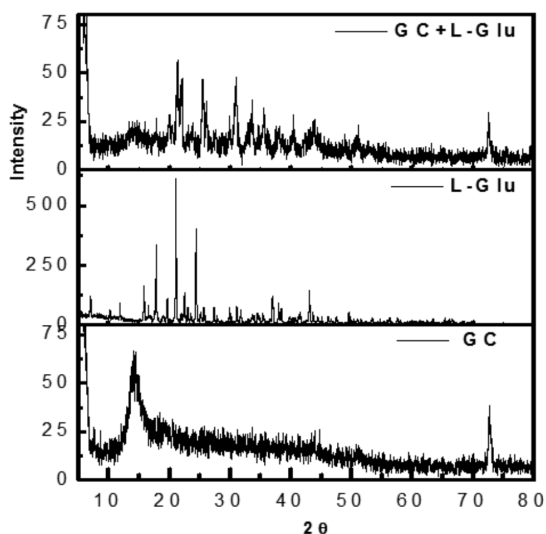


Рис. 3. Дифрактограммы GC; Glu; GC+L-Glu

Из сравнения дифрактограмм исходных соединений GC, L-Glu и дифрактограммы комплекса GC+L-Glu можно видеть снижение интенсивности рефлексов GC, а также снижение интенсивности и уширение рефлексов L-Glu, что может свидетельствовать о значительной потере кристалличности L-Glu. Данный эффект может быть связан с молекулярным диспер-

гированием L-Glu в твердую фазу комплексообразователя с образованием комплексов.

*Выводы из биологических испытаний*

L-Glu в комплексе с GC оказывают выраженное нейропротекторное действие по сравнению с исходными компонентами. Клетки мозга и кардиомиоциты были с более выраженными ядрами и цитоплазмой. Хорошо сохранилась поперечная исчерченность миофибрилл сердечной ткани. Пирамидальные клетки и клетки нейроглии хорошо выражены. Данная картина возможна из-за митохондриальной активности и аккумуляции АТФ в этих клетках за счет препаратов L-Glu в комплексе с GC.

**Заключение**

Проведенные исследования позволили установить, что при твердофазном синтезе между GC и L-Glu образуется супрамолекулярный комплекс с соотношением компонентов 1:1, удерживаемый за счет электростатических взаимодействий, за счет образования водородных связей между компонентами и изменения их кристаллической структуры. Комплекс обладал более выраженным нейропротекторным эффектом в условиях гипоксии, по сравнению с исходными соединениями, и может представлять интерес для практического использования.

**Список литературы**

1. Zhu H., Wang H., Shi B., Shanguan L., Tong W., Yu G., Mao Z., Huang F. Supramolecular peptide constructed by mo-

lecular Lego allowing programmable self-assembly for photodynamic therapy. *Nat Commun.* 2019. 3. 10 (1). P. 2412.

2. Martins J.N., Lima J.C., Basílio N. Selective Recognition of Amino Acids and Peptides by Small Supramolecular Receptors. *Molecules.* 2020. Vol. 26 (1). P. 106–151.

3. Bera S., Mondal S., Rencus-Lazar S., Gazit E. Organization of Amino Acids into Layered Supramolecular Secondary Structures. *Acc Chem Res.* 2018. Vol. 51 (9). P. 2187–2197.

4. Bera S., Xue B., Rehak P., Bera S., Xue B., Rehak P., Jacoby G., Ji W., Shimon L.J.W., Beck R., Král P., Cao Y., Gazit E. Self-Assembly of Aromatic Amino Acid Enantiomers into Supramolecular Materials of High Rigidity. *ACS Nano.* 2020. Vol. 14 (2). P. 1694–1706.

5. Tykarska E., Sobiak S., Gdaniec M. Supramolecular Organization of Neutral and Ionic Forms of Pharmaceutically Relevant Glycyrrhizic Acid-Amphiphile Self-Assembly and Inclusion of Small Drug Molecules. *Growth. Des.* 2012. Vol. 12. P. 2133–2137.

6. Алмакаева Л.Г., Литвинова Е.В. Аргинин и его применение в медицине и фармации // *Ліки України плюс.* 2011. № 1. С. 23–26.

7. Какегава К. Заявка. 44-11913, 30.05.84. Япония. Соли глицирризиновой кислоты. Марудзэнфармац.

8. Яковичин Л.А., Гришкoveц В.И., Корж Е.Н. Супрамолекулярный комплекс моноаммонийной соли глицирризиновой кислоты (глицирама) с кофеином // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия.* 2017. № 3. С. 270–277.

9. Francioso A., Conrado A.B., Mosca L., Fontana M. Chemistry and Biochemistry of Sulfur Natural Compounds: Key Intermediates of Metabolism and Redox Biology. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity.* 2020, Article ID 8294158. P. 27.

10. Hwang H.S., Winkler-Moser J.K., Liu S.X. Study on Antioxidant Activity of Amino Acids at Frying Temperatures and Their Interaction with Rosemary Extract, Green Tea Extract, and Ascorbic Acid. *J Food Sci.* 2019. No. 84 (12). P. 3614–3623.

11. Далимова С.Н., Кузиев Ш.Н., Далимов Д.Н., Умарова Г.Б., Мухамаджанова Г.М., Абдуллаева У.А. Скрининг антиоксидантной активности супрамолекулярных комплексов, созданных на основе природных соединений // *Журн. теорет. и клин. медицины.* 2017. № 3. С. 14–17.

12. Якубке Х.-Д., Ешкайт Х. Аминокислоты. Пептиды. Белки. Под ред. докт. хим. наук, проф. Ю.В. Митина. М.: «Мир», 1985. 82 с.

13. Толстикова Т.Г., Толстикова А.Г., Толстикова Г.А. На пути к малодозным лекарствам // *Вестн. РАН.* 2007. Т. 77. № 10. С. 867–874.

14. Метелева Е.С., Душкин А.В., Толстикова Т.Г., Хвостов М.В. Создание лекарственных препаратов повышенной эффективности механохимического комплексования глицирризиновой кислоты с фармаконами // *Актуальные проблемы химии природных соединений: тез. докл. Междунар. конф. Ташкент (Узбекистан).* 2010. С. 64.

15. Дыгай А.М., Жданов В.В., Хлусов И.А., Любавина П.А., Новицкий Е.В., Кусмарцев С.А., Гольдберг Е.Д. О возможности стимуляции глицирамом костномозгового кроветворения в условиях цитостатической гемодепрессии // *Эксп. и клин. фармакология.* 1995. Т. 58. № 2. С. 40–42.

16. Джуманазарова А.З., Матаипова А., Кадыралиев Т.К., Райымбеков Ж.К., Курамаева Т.Э., Маметова А., Кундашев У.К. Биологические испытания в условиях высокогорья комплексов глицирама с L-глутаминовой и D-аспарагиновой кислотами // *Здравоохранение Кыргызстана.* 2017. № 3. С. 52–57.

17. Яковичин Л.А., Гришкoveц В.И., Корж Е.Н. Супрамолекулярные комплексы моноаммонийной соли глицирризиновой кислоты (глицирама) с L-аргинином и глицином // *Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Сер. «Биология, химия».* 2014. Т. 27 (66). № 4. С. 131–137.

18. Булатов М.И., Калинин И.П. Практическое руководство по фотометрическим методам анализа. 5-е изд. Л.: Химия, 1986. 432 с.

УДК 679.861(575.2)

## СОСТАВ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕНТОНИТА БЕШКЕНТСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

<sup>1</sup>Джусуева М.С., <sup>2</sup>Исмагилаев С.П., <sup>1</sup>Осмонова С.С., <sup>1</sup>Саркелов Ж.С.

<sup>1</sup>Кыргызский национальный университет им. Ж. Баласагына, Бишкек,  
e-mail: chemistdjusuevaknu@gmail.com;

<sup>2</sup>Пробирно-аналитическая лаборатория золотоизвлекающей фабрики Кумтор Голд Компани, Бишкек

Статья посвящена изучению свойств глины месторождения Бешкент. Глина этого месторождения не была изучена. В литературе имеются данные, что ранее глина этого месторождения применялась в качестве буровых растворов. В связи с расширяющимся спектром применения бентонитовых глин в фармации, в косметологии, в качестве биологически активных добавок нами было предпринято данное исследование. По соотношению содержания оксида алюминия к диоксиду кремния глина месторождения Бешкент относится к бентонитовым глинам. Химический анализ показал содержание оксидов кальция, магния и углерода, что говорит о наличии карбонатных пород в составе глины. В глине присутствуют незначительные количества оксидов железа, фосфора и титана. Изучение дисперсности частиц, составляющих глину, показало, что в глине Бешкентского месторождения больше всего частиц с размерами < 0,005 мм (68,26%), а частиц с размерами < 0,001 мм всего 1,90%. Определение значения емкости обмена Бешкентской глины является не самым высоким согласно классификации глин по значению величины емкости обмена. Но все же полученное значение емкости обмена (60 мг-экв на 100 г глины) позволяет отнести глину Бешкентского месторождения к бентонитовым глинам. Значение pH водной суспензии глины данного месторождения также говорит о том, что глина этого месторождения является бентонитовой. Таким образом, изучены физико-химические свойства глины Лейлекского района Баткенской области Кыргызстана (проведен химический анализ на содержание Si, Al, Ca, Mg, Na и других элементов, определены гранулометрический состав и катионная емкость сырья месторождения Бешкент).

**Ключевые слова:** Бешкент, бентонитовая глина, карбонатная порода, величина емкости обмена, суспензия

## THE COMPOSITION AND PHYSIKO-CHEMICAL PROPERTIES OF BENTONITE FROM BESHKENT

<sup>1</sup>Dzhusueva M.S., <sup>2</sup>Ismatillaev S.P., <sup>1</sup>Osmonova S.S., <sup>1</sup>Sarkelov Zh.S.

<sup>1</sup>Kyrgyz National University named after J. Balasagyn, Bishkek, e-mail: chemistdjusuevaknu@gmail.com;

<sup>2</sup>The Assay and Analytical Laboratory of the Gold Extraction Factory Kumtor Gold Company, Bishkek

The article is devoted to the study of the properties of clay from the Beshkent deposit. The clay of this deposit has not been studied. There is evidence in the literature that previously the clay of this deposit was used as drilling fluids. In connection with the expanding range of application of bentonite clays in pharmacy, in cosmetology, as biologically active additives, we undertook this study. According to the ratio of the content of aluminum oxide to silicon dioxide, Beshkent clay belongs to bentonite clays. Chemical analysis showed the presence of calcium oxide, magnesium oxide and carbon monoxide in the clay, which indicates the presence of carbonate rocks in the clay composition. Clay contains trace amounts of iron oxides, phosphorus and titanium oxides. The study of the dispersion of the particles that make up the clay showed that in the clay of the Beshkent deposit there are most particles with sizes <0.005 mm (68.26%), and particles with sizes <0.001 mm are only 1.90%. Determination of the value of the exchange capacity of Beshkent clay is not the highest according to the classification of clays according to the value of the exchange capacity. Nevertheless, the obtained value of the exchange capacity (60 meq per 100 g of clay) allows us to classify the clay of the Beshkent deposit as bentonite clay. The pH value of the aqueous suspension of the clay of this deposit also indicates that the clay of this deposit is bentonite. Thus, we studied the physicochemical characteristics of the studied raw materials of Leilek district of Batken region of Kyrgyzstan (chemical analyzes of Si, Al, Ca, Mg, Na and other elements, which confirmed the composition of local clay, granulometric composition and cationic capacity of clay from the Beshkent deposit).

**Keywords:** Beshkent, bentonite clay, carbonate rock, exchange capacity, suspension

Бентонитовые глины широко изучаются в настоящее время. Если в литературе более раннего периода отображались вопросы применения глины как добавки к лечебным препаратам, улучшающим свойства лечебной основы, то теперь взгляд ученых на глину изменился. Сейчас глину рассматривают как лечебный комплекс, имеющий широкий спектр полезных свойств, делая упор на исследование производных бенто-

нитов [1] и нанокомпозитов на основе бентонитов [2, 3]. В работе [4] глинистые минералы нашли применение как наполнители сорбентов для очистки органических и неорганических загрязнителей. Также глины находят применение в фармацевтической и косметической промышленности [5]. Производные монтмориллонита находят антибактериальное применение [6]. Катионзамещенные монтмориллонит и вермикулит

применяются для адсорбционного извлечения шестивалентного хрома [7]. Амин- и карбоксилзамещенные бентониты нашли применение для адсорбционного извлечения таких тяжелых металлов, как свинец, ртуть и медь, и других металлов из водных растворов [8]. В работе [9] удаление тяжелых металлов Cd, Cu и Pb из воды путем адсорбции Na-бентонитом рассматривалось в зависимости от pH и ионной силы. Классическая адсорбция метиленового голубого была изучена авторами работы [10], которые для улучшения адсорбции использовали плазменную модификацию поверхности бентонитовой глины. Получение и антибактериальная активность нанокомпозитов на основе хитозана, содержащих наночастицы серебра и оксида цинка на бентонитовой основе, для обеззараживания воды рассматривается авторами работы [11]. Авторами работы [12] было найдено, что бентонит защищает стволовые клетки нервного гребня от смерти, вызванной афлатоксином B<sub>1</sub>. Авторы работы утверждают, что многие исследования *in vitro* показали влияние бентонита на различные типы клеток, но сопоставимой информации о его влиянии на стволовые клетки нервного гребня (NC) нет. Клетки нервного гребня (NC) считаются идеальной моделью для изучения роли различных веществ в дифференцировке, выживании и росте клеток. Было выяснено, что афлатоксин B<sub>1</sub> (AFB<sub>1</sub>) снижает жизнеспособность и уменьшает популяцию NC-клеток. Авторы работы охарактеризовали бентонит, добываемый на юге Бразилии, и исследовали его влияние на дифференциацию и выживаемость NC при воздействии AFB<sub>1</sub> и пришли к выводу, что бентонит увеличивал жизнеспособность NC-клеток, ранее обработанных AFB<sub>1</sub>, не влияя на дифференцировку клеток. Авторы работы [13] изучили равновесную и кинетическую адсорбцию лекарств на бентоните и выяснили, что удаление лекарств из воды очень чувствительно к перепадам температуры и что присутствие поверхностно-активных веществ в среде резко влияет на усвоение лекарств, глина становится более эффективной как адсорбент после модификации поверхностно-активными веществами. В работе [14] авторы исследовали комплексообразование наночастиц аллофана с дисплатиной, – дихлорид-амминплатиной (II) для доставки пролекарства платины в раковые клетки. На клетках карциномы легкого человека (A549) были подробно обсуждены глубокие исследования, включая анализ клеточного поглощения (эндоцитоза) наночастиц аллофана, способности останавливать клеточный цикл и профили индукции апоптоза. Также были

обсуждены особенности против клеток A549, которые могут стать многообещающей стратегией для повышения их противораковой активности и смягчения побочных эффектов. В работе [15] исследовали разработку антимикробного нанокомпозита в качестве двойной системы доставки лекарств для терапии опухолей, чувствительного к pH. С помощью ионного обмена синтезирован новый антибактериальный нанокомпозит глина / полимер со средним размером частиц 20–40 нм. Результаты исследований привели к выводу, что антибактериальный нанокомпозит с двойным содержанием лекарств может быть использован для лечения рака.

Очень широко исследуются нанокомпозиты на основе бентонита, которые предполагается использовать в различных областях. Например, нанокомпозиты хитозана с бентонитом были исследованы для применения в качестве пленок для заживления ран [16]. Этот же нанокомпозит хитозана с бентонитом рассматривается как средство высокоэффективной инактивации питьевой воды от бактерий [17]. Другими авторами изучались электрокинетические свойства и антимикробная активность биоразлагаемых хитозан / органо-бентонитовых композитов [18]. Учитывалось влияние pH электролитов, поверхностно-активных веществ и температуры. Композиты бентонита с хитозаном, натриевого бентонита были протестированы против различных бактерий и грибов. Антимикробная активность композитов возрастала с увеличением значений ζ-потенциала. Наблюдались более сильные или равнозначные противомикробные эффекты, чем у контрольных. Авторы работы [19] изучали возможность применения бентонита натрия в качестве вспомогательного вещества в составе таблеток с замедленным высвобождением.

В работе авторов [20] монтмориллонит рассматривается как многообещающая эффективная кормовая добавка благодаря его рентабельности и почти без побочных эффектов. Монтмориллонит обладает высокой адсорбцией микотоксинов, бактерий, тяжелых металлов в кормах и организме животных, поэтому добавки к кормам животных имеют положительное влияние на биохимические показатели подопытных животных.

В литературе отсутствуют данные по изучению свойств бентонита юга Кыргызстана – Бешкентского бентонита.

#### Материалы и методы исследования

Объектом исследования явился бентонит Бешкентского месторождения, который находится в Лейлекском районе Баткенской



области Кыргызстана на абсолютной высоте 1350–1450 м. Месторождение было разведано в 1968 г., доразведано в 1973–1974 гг. Мощность залегания колеблется от 5 до 20 м [21].

Для физико-химической характеристики бентонита был проведен химический анализ, определен гранулометрический состав и катионная емкость глины месторождения Бешкент.

Химический анализ глин проведен спектральным методом в лаборатории «Стюарт Эссей энд Инвайронментал лэборэторис» на приборе ICP OES Optima 7000 (индуктивно связанная плазма).

В табл. 1 показан химический состав глины Бешкент. По соотношению содержания оксида алюминия к диоксиду кремния глина Бешкент относится к бентонитовым глинам. По содержанию оксидов кальция,

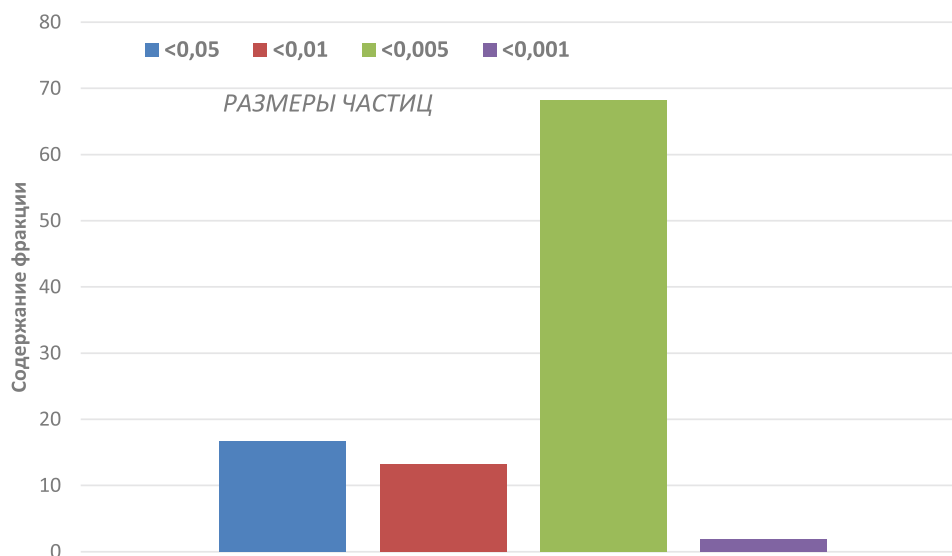
магния и углерода можно предположить наличие карбонатных пород в составе глины. В глине присутствуют незначительные количества оксидов железа, фосфора и титана.

Для характеристики степени дисперсности и структуры глин, которые являются одним из главных факторов, оказывающих существенное влияние на их различные физические и механические свойства, нами проводилось определение гранулометрического состава. Данные гранулометрического анализа приведены в табл. 2 и на рисунке. Как видно из приведенных данных исследования, в глине Бешкентского месторождения больше всего частиц с размерами < 0,005 мм (68,26%), а частиц с размерами < 0,001 мм всего 1,90%, содержание крупных частиц с размерами < 0,05 мм составляет 16,64%, а количество частиц размером < 0,01 мм составляет 13,20%.

Таблица 1

Химический состав глины Бешкентского месторождения, %

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	П.П.П	сумма
50,70	9,26	14,79	4,21	5,06	3,18	0,94	3,10	0,28	0,56	16,02	0,55	5,19	98,7



Гранулометрический состав Бешкентской глины

Таблица 2

Гранулометрический состав глины Бешкентского месторождения

Диаметр частиц, мм	Глубина взятия пробы, см	Интервалы времени взятия пробы в зависимости от t °C		Содержание фракции, %
		22,5	25	
< 0,05	25	105 с	100 с	16,64
< 0,01	10	17 мин 33 с	16 мин 35 с	13,20
< 0,005	10	1 ч 45 мин 12 с	1 ч 6 мин 21 с	68,26
< 0,001	7	20 ч 28 мин 59 с	19 ч 21 мин 12 с	1,90

Таблица 3

Емкость обмена и состав обменных катионов глины Бешкентского месторождения

Месторождение глины	мг-экв на 100 г глины				рН водной суспензии
	Емкость обмена	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	
Бешкент	60	39,0	17,5	3,5	8,55

Для характеристики физико-химических свойств исследуемых глин нами определялась емкость обмена и состав обменных катионов по методу Бабко – Аскинази. Экспериментальные данные представлены в табл. 3. Здесь же указано значение рН водной суспензии глины.

Как видно из табл. 3, значение емкости обмена Бешкентской глины является не самым высоким согласно классификации глин по значению величины емкости обмена. Но все же полученное значение емкости обмена (60 мг-экв на 100 г глины) позволяет отнести глину Бешкентского месторождения к бентонитовым глинам; рН водной суспензии глины данного месторождения также говорит о том, что глина этого месторождения является бентонитовой.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Экспериментальные данные химического анализа позволяют отнести глину изученного месторождения к бентонитовым глинам по соотношению содержания оксида алюминия к диоксиду кремния. А также можно предположить о наличии карбонатных пород в составе глины по содержанию оксидов кальция, магния и углерода.

Гранулометрический анализ глины Бешкентского месторождения показал, что содержание крупных частиц с размерами < 0,05 мм составляет 16,64%, а количество частиц размером < 0,01 мм составляет 13,20%. Больше всего частиц с размерами < 0,005 мм (68,26%), а частиц с размерами < 0,001 мм всего 1,90%.

Значение емкости обмена Бешкентской глины является не самым высоким согласно классификации глин по значению величины емкости обмена. Но все же полученное значение емкости обмена позволяет отнести глину Бешкентского месторождения к бентонитовым глинам; рН водной суспензии глины данного месторождения также позволяет отнести ее к бентонитовой глине.

#### Заключение

1. Определены химический и гранулометрический состав глины месторождения Бешкент. По химическому составу и размерам частичек, образующих глину место-

рождения Бешкент, ее можно отнести к высокодисперсным, то есть к бентонитовым, что объясняет хорошие адсорбционные свойства этой глины.

2. Определено значение величины емкости обмена глины. По значению величины емкости обмена катионов изучаемая глина относится к бентонитовым глинам со средним значением величины емкости обмена.

#### Список литературы

- Sidi Zhu, Mingzhu Xia, Yuting Chu, Muhammad Asim Khan, Wu Lei, Fengyun Wang, Tahir Muhmood Along Wang. Adsorption and Desorption of Pb (II) on L-Lysine Modified Montmorillonite and the simulation of Interlayer Structure. Applied Clay Science. 2019. Vol. 169. P. 40–47.
- Gaiping Guo, Huafeng Tian, Qiangxian Wu. Influence of pH on the structure and properties of soy protein/montmorillonite nanocomposite prepared by aqueous solution intercalating. Applied Clay Science. 2019. Vol. 171. P. 14–19.
- Ediana P. Rebitski, Gabriel P. Souza, Sirlane A.A. Santana, Sibebe B.C. Pergher, Ana C.S. Alcântara, Gabriel P. Souza, Sirlane A.A. Santana, Sibebe B.C. Pergher, Ana C.S. Alcântara Bionanocomposites based on cationic and anionic layered clays as controlled release devices of amoxicillin. Applied Clay Science. 2019. Vol. 173. P. 35–45.
- Eleni Koutsopolou, Dimitris Papoulis, Panagiota Tsolis-Katagas, Michael Komoros. Clay minerals used in sanitary landfills for the retention of organic and inorganic pollutants. Applied Clay Science. 2010. Vol. 49 (4). P. 372–382.
- M. Isabel Carretero, Manuel Pozo. Clay and non-clay minerals in the pharmaceutical and cosmetic industries. Part II. Active ingredients. Applied Clay Science. 2010. Vol. 49 (4). P. 372–382.
- Günseli Özdemir, Saadet Yapar, Mine Hoşgör Limoncu. Preparation of cetylpyridinium montmorillonite for antibacterial applications. Applied Clay Science. 2013. Vol. 72. P. 201–205.
- Stefan Dultz Jong-Hyok An, Beate Riebe. Organic cation exchanged montmorillonite and vermiculite as adsorbents for Cr (VI): Effect of layer charge on adsorption properties. Applied Clay Science. 2012. Vol. 67–68. P. 125–133.
- Anirudhan T.S., Jalajamony S. Adsorption of heavy metal ions from aqueous solutions by amine and carboxylate functionalised bentonites. Applied Clay Science. 2012. Vol. 65–66. P. 67–71.
- Daniel A. Glatstein, Franco M. Francisca. Influence of pH and ionic strength on Cd, Cu and Pb removal from water by adsorption in Na-bentonite. Applied Clay Science. 2015. Vol. 118. P. 61–67.
- Ömer Şahin, Mustafa Kaya, Cafer Saka. Plasma-surface modification on bentonite clay to improve the performance of adsorption of methylene blue. Applied Clay Science. 2015. Vol. 116–117. P. 46–53.
- Sarah C. Motshekga. Suprakas Sinha Ray, Maurice S. Onyango, Maggie N.B. Momba. Preparation and antibacterial activity of chitosan-based nanocomposites containing bentonite-supported silver and zinc oxide nanoparticles for water disinfection. Applied Clay Science. 2015. Vol. 114. P. 330–339.
- Janaina Nones, Jader Nones, Humberto Gracher Riella, Nivaldo Cabral Kuhn, Andrea Trentin. Bentonite protects neural crest stem cells from death caused by aflatoxin B1. Applied Clay Science. 2015. Vol. 104. P. 119–127.

13. Elif Çalışkan Salihi, Mehmet Mahramanlı oğlu. Equilibrium and kinetic adsorption of drugs on bentonite: Presence of surface active agents effect. *Applied Clay Science*. 2014. Vol. 101. P. 381–389.
14. Юсуке Тойота, Масами Окамото, Шуичи Аракава. New opportunities for drug delivery carrier of natural allophane nanoparticles on human lung cancer A549 cells. *Applied Clay Science*. 2017. Vol. 143. P. 422–429.
15. Fatemeh Bazmi Zeynabad, Roya Salehi, Mehrdad Mahkam. Design of pH-responsive antimicrobial nanocomposite as dual drug delivery system for tumor therapy. *Applied Clay Science*. 2017. Vol. 141. P. 23–35.
16. Nirmla Devi, Joydeep Dutta. Preparation and characterization of chitosan-bentonite nanocomposite films for wound healing application. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2017. Vol. 104 (B). P. 1897–1904.
17. Sarah C. Motshekga, Suprakas Sinha Ray. Highly efficient inactivation of bacteria found in drinking water using chitosan-bentonite composites: Modelling and breakthrough curve analysis. *Water Research*. 2017. Vol. 111. P. 213–223.
18. Mehmet Cabuk, Yusuf Alan, H. Ibrahim Unal. Enhanced electrokinetic properties and antimicrobial activities of biodegradable chitosan/organo-bentonite composites. *Carbohydrate Polymers*. 2017. Vol. 161. P. 71–81.
19. Jamal Alyoussef Alkrad, Reham Abu Shmeis, Iyad Alshwabkeh, Husam Abazid, Mohammad Amin Mohammad. Investigation of the potential application of sodium bentonite as an excipient in formulation of sustained release tablets. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2017. Vol. 12 (3). P. 259–265.
20. Jia HuiLiu, Wen Kai Cai, Nafeesa Khatoon, Wei Hua Yuc Chun Hui Zhou. On how montmorillonite as an ingredient in animal feed functions. *Applied Clay Science*. 2021. Vol. 202. P. 105963.
21. Минеральные ресурсы неметаллических полезных ископаемых Кыргызской Республики: справочник. Бишкек, 1996. С. 232–235.

УДК 544.03:621.79.04/.05

## КОМПЛЕКСНЫЙ ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФЛЮСА, ДИФТАЛАТА БЕТУЛИНОЛА, ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА

<sup>1</sup>Полежаева Н.И., <sup>2</sup>Тарасова Л.С., <sup>1</sup>Вольф В.А., <sup>1</sup>Ламберг Е.Р., <sup>1</sup>Логачев Н.И.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», Красноярск, e-mail: piv-80@mail.ru;

<sup>2</sup>ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск, e-mail: luma10@yandexl.ru

Настоящая статья посвящена комплексному термическому анализу флюса, дифталата бетулинола, для трафаретной и паяльной паст, используемых в толсто пленочной и толсто пленочной технологиях поверхностного монтажа. Комплексным термическим анализом установлено, что процесс разложения дифталата бетулинола в атмосфере аргона и на воздухе протекает в две стадии в интервале температур 165–460 °С. Показано, что механизм разложения флюса в окислительной и инертной атмосфере различен, протекающие окислительные процессы затормаживают процесс полного распада структуры дифталата бетулинола. Дифференциальной сканирующей калориметрией и термогравиметрией установлено, что при нагревании дифталата бетулинола в инертной атмосфере аргона в интервале температур 165–460 °С происходит разложение дифталата бетулинола с потерей 96,5 % исходной массы, а в окислительной – 79,6%. Постадийное убывание массы флюса в интервале температур: на воздухе 165–215 °С – 19,3%, 215–355 °С – 25,4%, 355–390 °С – 26,3%; в атмосфере аргона: 165–285 °С – 24,9%, 285–355 °С – 17,0%, 355–465 °С – 54,3% свидетельствует о достаточно широком диапазоне флюсующей активности дифталата бетулинола. Широкий диапазон химической активности дифталата бетулинола позволяет использовать его в трафаретной и припойной пастах с различной температурой оплавления.

**Ключевые слова:** паста, флюс, дифталат бетулинола, термическая деструкция, термоокислительная деструкция, поверхностный монтаж

## COMPREHENSIVE THERMAL ANALYSIS OF FLUX, BETULINOL DIPHTHALATE, FOR SURFACE MOUNTING TECHNOLOGY

<sup>1</sup>Polezhaeva N.I., <sup>2</sup>Tarasova L.S., <sup>1</sup>Volf V.A., <sup>1</sup>Lamberg E.R., <sup>1</sup>Logachev N.I.

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, e-mail: piv-80@mail.ru;

<sup>2</sup>FIC «Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS», Krasnoyarsk, e-mail: luma10@yandexl.ru

This article is devoted to the complex thermal analysis of flux, betulinol diphthalate, for stencil and solder pastes used in thick-film and thick-film surface mount technologies. Comprehensive thermal analysis established that the decomposition of betulinol diphthalate in an argon atmosphere and in air proceeds in two stages in the temperature range 165-460 °C. It is shown that the mechanism of decomposition of the flux in an oxidizing and inert atmosphere is different, the ongoing oxidative processes inhibit the process of complete decomposition of the structure of betulinol diphthalate. Differential scanning calorimetry and thermogravimetry established that when betulinol diphthalate is heated in an inert atmosphere of argon in the temperature range 165-460 °C loss of 96.5% of the original mass, and in the oxidizing one – 79.6%. Stepwise decrease in the mass of the flux in the temperature range: in air 165-215 °C – 19.3%, 215-355 °C – 25.4%, 355-390 °C – 26.3%; in an argon atmosphere: 165-285 °C – 24.9%, 285-355 °C – 17.0%, 355-465 °C – 54.3% indicates a fairly wide range of fluxing activity of betulinol diphthalate. The wide range of chemical activity of betulinol diphthalate makes it possible to use it in stencil and solder pastes with different reflow temperatures.

**Keywords:** paste, flux, betulinol diphthalate, thermal destruction, thermal oxidative destruction, surface mounting

В настоящее время номенклатура порошков для технологии поверхностного монтажа продолжает расширяться, однако единой пасты, удовлетворяющей требованиям технологии, не разработано [1].

Флюс, являясь компонентом пасты, должен обеспечивать прохождение процесса пайки или вжигания в той температурной области, в которой оплавляются паяльная или трафаретная пасты.

В связи с этим подбор соответствующего флюса для рецептур паст для трафаретной печати и порошков припоя для низкотемпературной пайки продолжает оставаться актуальным.

Целью данной работы является исследование физико-химических свойств флюса, дифталата бетулинола, для паст, используемых в тонко пленочной и толсто пленочной технологии поверхностного монтажа при изготовлении электронных устройств.

### Материалы и методы исследования

В качестве флюса для паяльной пасты использовали дифталат бетулинола (C<sub>46</sub>H<sub>58</sub>O<sub>8</sub>) [2].

Дифталат бетулинола – 3β,28-дифталатокси-луп-20(29)-ен формулы (I) является сложным эфиром фталевой кислоты и бетулинола (рис. 1).

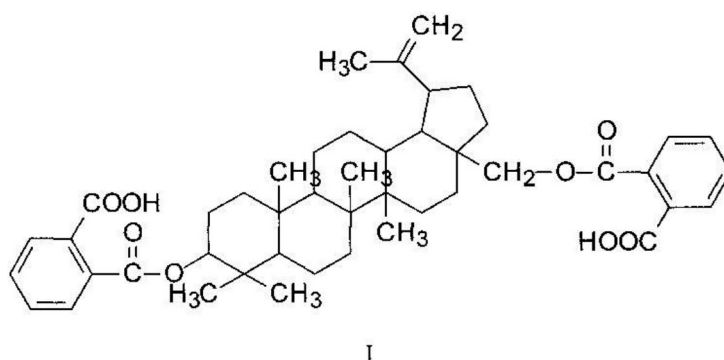


Рис. 1. Структурная формула дифталата бетулинола

Комплексный термический анализ образцов дифталата бетулинола проведен с помощью синхронного термоанализатора STA 449 *Jupiter* (фирмы NETZSCH), сочетающего одновременное измерение изменений массы (термогравиметрия, TG) и тепловых потоков (дифференциальная сканирующая калориметрия, DSC).

Использовался платина/платино-родиевый держатель (TG-DSC сенсор типа S) в сочетании с  $Al_2O_3$ -тиглями с проколотыми крышками. Образцы подвергались нагреванию по температурной программе со скоростью 5 К/мин от 40 °С до 500 °С. Для исследования термодеструкции один из образцов нагревался в динамической атмосфере аргона со скоростью потока 40 мл/мин. Другой – при изучении термоокислительной деструкции – в потоке воздуха со скоростью 30 мл/мин.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Вопросы конструирования и технологии изготовления изделий всегда находятся в тесной связи [3]. Особенно отчетливо это проявляется применительно к микросхемам. Пленочные интегральные схемы могут быть выполнены на тонких и на толстых пленках или при сочетании тех и других. Трафаретная и паяльная паста должны обладать хорошей адгезией к подложке, что зависит от выбранного связующего и флюса [4].

Впервые в качестве флюсов в паяльных пастах было предложено использовать четвертичные аммониевые соли [5]. Изготовление электронных устройств дорогостоящее и трудоёмкое, следовательно, свойства материалов, используемых в их производстве, должны быть всесторонне исследованы. Физико-химическое исследование бро-

мида диэтилдибензиламмония показало, что он обладает хорошими флюсующими свойствами в низкотемпературных паяльных пастах с рабочей температурой оплавления порошков припоя в интервале температур 140–250 °С [6]. Оставшаяся часть флюса-связки после пайки некоррозионно-активная и непроводящая, что позволяет исключить стадию отмычки печатных плат, их ремонт и снизить трудоемкость при изготовлении электронных устройств. Для расширения номенклатуры флюсов для паст, используемых в технологии поверхностного монтажа, предложено использовать дифталат бетулинола.

Химическая активность флюса зависит от многих факторов, особенно от концентрации реагируемых материалов, температуры, времени и окружающей среды: инертной или окислительной. В связи с этим деструкция дифталата бетулинола исследовалась в инертной и окислительной атмосфере.

На рис. 2 приведена термограмма разложения дифталата бетулинола при нагревании его в инертной атмосфере (аргон). Данный образец термически устойчив до 185 °С. Небольшая убыль массы (0,6%) в начале нагрева связана с процессом ухода адсорбционной влаги, которому соответствует широкий эндтермический эффект на кривой DSC с максимумом при температуре 64,7 °С.

Плавление данного образца дифталата бетулинола происходит при температуре 165,5 °С ( $\Delta H = 13,89$  J/g). После чего наступает процесс его деструкции, протекающий в несколько стадий. Первая стадия термодеструкции дифталата бетулинола протекает в температурной области 185–290 °С и описывается широким плохо выраженным эндотермическим эффектом ( $\Delta H = 42,41$  J/g).

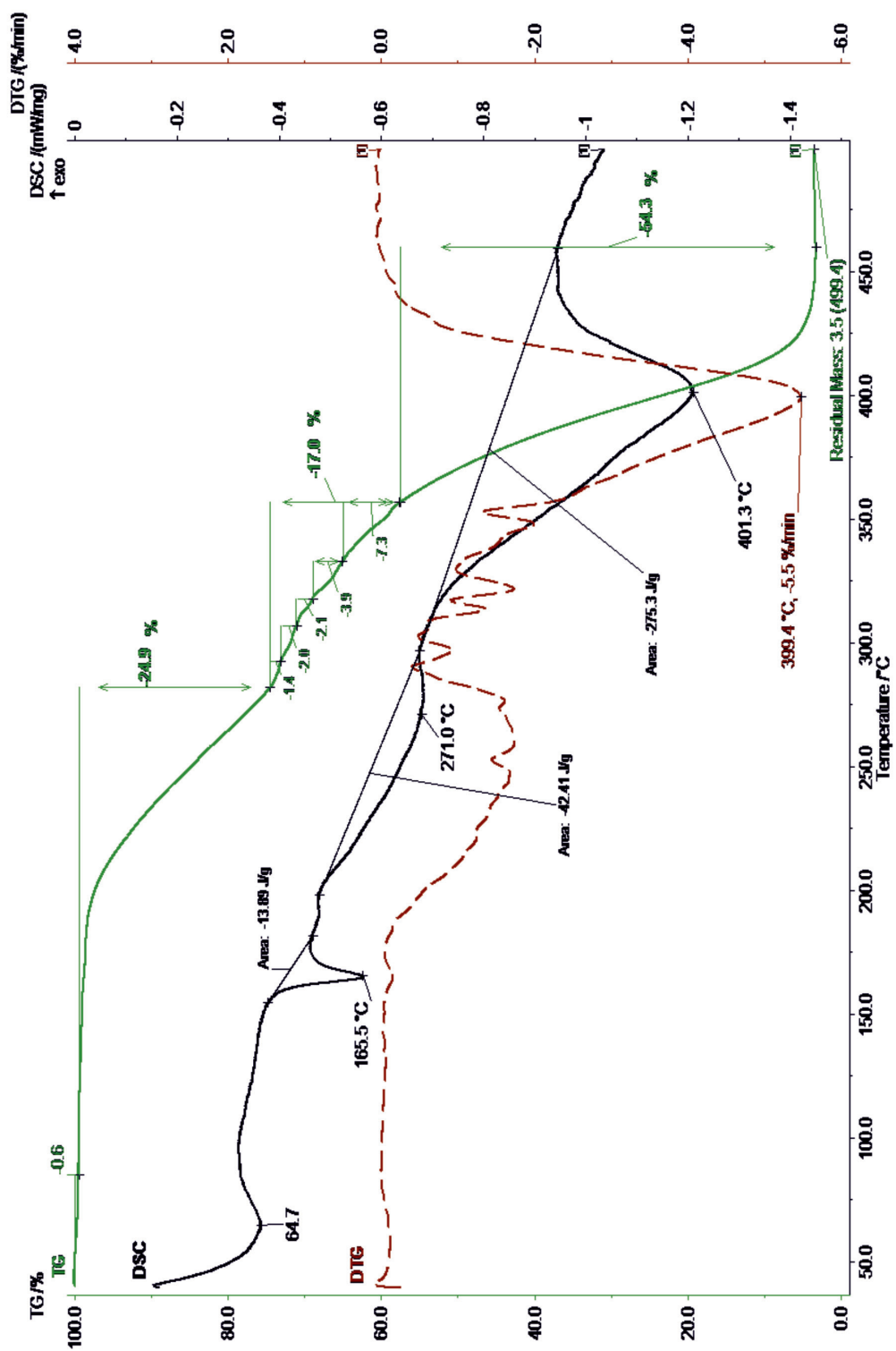


Рис. 2. Кривые TG, DTG и DSC для дифталата бензилола при нагревании в атмосфере аргона

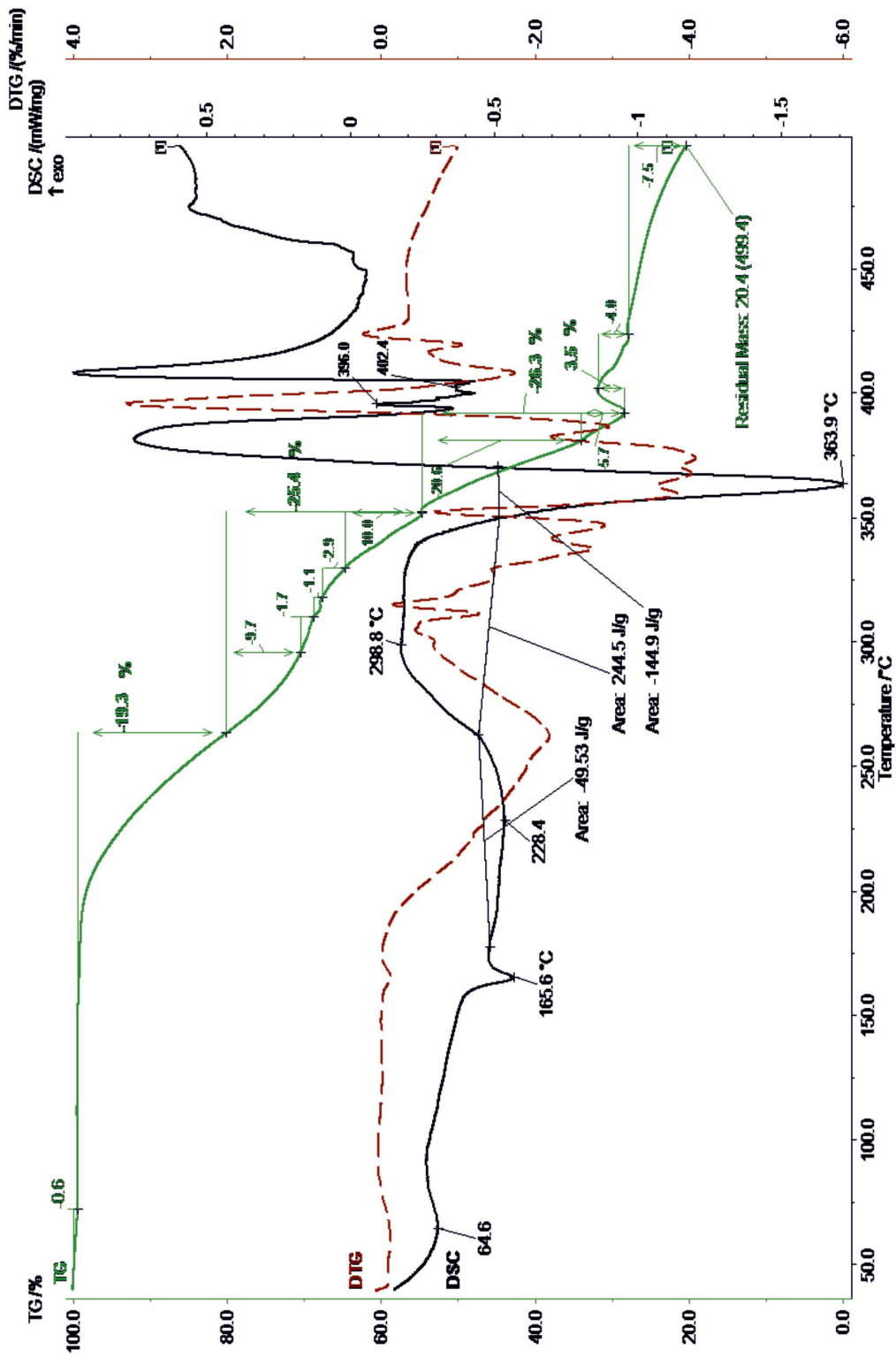


Рис. 3. Кривые TG, DTG и DSC для диффралаата бетулинола при нагревании на воздухе

Потеря массы на этом этапе составила 24,9% от исходной массы образца. Исходя из анализа структурной формулы дифталата бетулинола (рис. 1), это может быть следствием отщепления моноэфирной группировки, связанной с циклической структурой спирта через метиленовую группу:  $\text{CH}_2 - \text{O} - \text{CO} - \text{C}_6\text{H}_4(\text{COOH})$ . Молярная масса этой группировки ( $\text{C}_9\text{H}_7\text{O}_4$ ) составляет 197 г/моль, что соответствует 24,25% мас.

Вторая стадия процесса описывается значительным эндотермическим эффектом при температуре максимума 401,3 °C ( $\Delta H = 275,3 \text{ J/g}$ ).

На второй стадии процесса разложения дифталата бетулинола можно выделить два участка. Первый – в области температур 290–360 °C, который характеризуется ступенчатой потерей массы: 2,0; 2,1; 3,9 и 7,3% (рис. 2, кривая TG) при температурах 297,5; 314,0; 322,2 и 348,5 °C соответственно. Суммарная убыль массы на этом участке составила 16%. Такой характер потери массы образца может быть связан с последовательным отщеплением боковых радикалов в молекуле бетулинола, расчетная масса этих элементов его структуры составляет 17% мас.

Второй участок относится к температурной области 360–460 °C. Разложение при этом проходит более интенсивно – со скоростью 5,5%/мин, что значительно превышает среднюю скорость убыли массы на первом участке: 0,5–1,3%/мин. В этой температурной области происходит убыль 54,3% исходной массы, что связано, вероятно, с распадом многоядерной циклической структуры бетулинола, молярная масса которого 443 г/моль, что составляет 60% мас. По окончании процесса нагрева к 500 °C остаточная масса образца составила 3,5%, что свидетельствует о полном распаде структуры дифталата бетулинола.

На рис. 3 приведена термограмма разложения дифталата бетулинола в окислительной атмосфере. Термическая устойчивость данного вещества при нагревании на воздухе находится в тех же пределах (185 °C), что и при нагревании в аргоне.

Процесс разложения дифталата бетулинола при нагревании на воздухе, так же как и в аргоне, протекает в две стадии.

Первая стадия процесса термоокислительной деструкции дифталата бетулинола наступает после плавления вещества ( $T_m = 165,6 \text{ °C}$ ), сопровождается потерей 19,3% исходной массы и описывается на кривой DSC широким плохо выраженным эндотермическим эффектом с  $\Delta H = 49,53 \text{ J/g}$ . Сопоставляя величины потери массы на этой стадии и строение

моноэфирной группировки, можно предположить, что в окислительной атмосфере ее отщепление происходит по сложноэфирной связи. Молярная масса уходящей в этом случае группы ( $\text{C}_8\text{H}_5\text{O}_3$ ) составляет 149 г/моль и соответствует 20,2% мас., что хорошо коррелирует с экспериментальным значением убыли массы на этой стадии.

Окислительная атмосфера вносит ряд отличий в характер термоаналитических кривых. Так, если для инертной атмосферы характерен эндотермический характер всех происходящих процессов, то при нагревании на воздухе на кривой DSC присутствуют и экзотермические эффекты, что свидетельствует о протекании и окислительных процессов.

На второй стадии процесса термоокислительной деструкции дифталата бетулинола в области температур 265–350 °C на кривой DSC наблюдается широкий экзотермический эффект при температуре максимума 298,8 °C с  $\Delta H = -244,5 \text{ J/g}$ . Процесс убыли массы на этой стадии, так же как и при нагревании в инертной атмосфере (рис. 3), носит ступенчатый характер и, по всей вероятности, также соответствует отщеплению боковых радикалов в структуре спирта, которые в воздушной атмосфере окисляются, что приводит к значительно большей убыли массы – 25,4%, по сравнению с термодеструкцией.

Третья стадия процесса термоокислительной деструкции, связанная, по видимости, с распадом циклической структуры бетулинола, характеризуется узким эндотермическим эффектом с максимумом при температуре 363,9 °C и  $\Delta H = 142,8 \text{ J/g}$ . Следует отметить, что геометрия и энергетические характеристики этого эффекта существенно отличаются от наблюдаемого в этой области температур при нагреве в инертной атмосфере: температура его максимума – 363,9 °C значительно ниже (401,3 °C), поглощаемая энергия – 142,8 J/g почти вдвое меньше (275,3 J/g). Убыль массы на этом участке протекает в две ступени, составляя в сумме 26,3%, что также  $\approx$  в 2 раза меньше (54,3%). Все эти показатели свидетельствуют об ином механизме процесса разложения исходной структуры в окислительной атмосфере по сравнению с инертной. И дальнейший характер термоаналитических кривых это подтверждает: наблюдается серия экзотермических эффектов при 396,0 и 402,4 °C, которые сопровождаются увеличением массы на 3,5%.

### Заключение

Комплексным термическим анализом установлено, что процесс разложения флю-



са дифталата бетулинола в инертной и окислительной атмосфере протекает в две стадии в интервале температур 165–460 °С.

Механизм разложения флюса в окислительной и инертной атмосфере различен, протекающие окислительные процессы затормаживают процесс полного распада структуры дифталата бетулинола: его остаточная масса при нагревании на воздухе составила 20,4% в отличие от 3,5% – в аргоне.

Постадийное убывание массы флюса в интервале температур: на воздухе 165–215 °С – 19,3%, 215–355 °С – 25,4%, 355–390 °С – 26,3%; в атмосфере аргона: 165–285 °С – 24,9%, 285–355 °С – 17,0%, 355–465 °С – 54,3% свидетельствует о достаточно широком диапазоне флюсующей активности дифталата бетулинола и возможности применения его в трафаретных и паяльных пастах с различной температурой вжигания и оплавления.

### Список литературы

1. Материалы для пайки и ремонта печатных плат // Группа компаний Остек. 2013. № 14. 92 с. [Электронный ресурс]. URL: [https://ostec-materials.ru/upload/iblock/f60/f60\\_b6471a7a2705150e35f4304955b10.pdf](https://ostec-materials.ru/upload/iblock/f60/f60_b6471a7a2705150e35f4304955b10.pdf) (дата обращения: 17.06.2021).
2. Левданский В.А., Левданский А.В., Кузнецов Б.Н. Способ получения дифталата бетулинола // Патент РФ № 2614149. Патентообладатель ФГБУН «Институт химии и химической технологии СО РАН». 2017. Бюл. № 9.
3. Белоус А.И., Емельянов В.А. Основы технологии микромонтажа интегральных схем. М.: ДМК Пресс, 2013. 316 с.
4. Архипов А.В. Технологии поверхностного монтажа [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / Б.Н. Березков; Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. акад. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т); А.В. Архипов. Самара: Издательство СГАУ, 2011. 84 с.: ил. Электрон. текстовые и граф. дан. (1 файл: 1,31 Мбайт). [Электронный ресурс]. URL: <https://rucont.ru/efd/229980> (дата обращения: 30.06.2021).
5. Полежаева Н.И., Полежаева И.В. Термическая деструкция бромид диэтилдипензиламмония // Химия и химическая технология: материалы II Международной Казахстанско-Российской конференции (Караганда, 28 февраля – 2 марта 2012 г.). Караганда: Издательство Карагандинского государственного университета им. академика Е.А. Букетова, 2012. Т. 1. С. 211–213.
6. Полежаева Н.И., Ромулов А.В. Физико-химическое исследование свойства флюса, бромид диэтилдипензиламмония, для низкотемпературных паяльных паст // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 10. С. 45–49.