

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

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ  
И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

**INTERNATIONAL  
JOURNAL OF APPLIED  
AND FUNDAMENTAL  
RESEARCH**

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

Двухлетний импакт-фактор  
РИНЦ = 0,593

Пятилетний импакт-фактор  
РИНЦ = 0,299

**№ 4 2024**

Научный журнал  
Scientific journal

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

Электронная версия размещается на сайте [www.rae.ru](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); к.т.н., доцент Хайдаров А.Г. (Санкт-Петербург); д.м.н., проф. Чарышкин А.Л. (Ульяновск); д.географ.н., проф. Чодураев Т.М. (Бишкек); д.б.н., проф. Шалпыков К.Т. (Бишкек); к.х.н. Шарифуллина Л.Р. (Москва); д.п.н., проф. Щирин Д.В. (Санкт-Петербург)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ  
И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

---

INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED  
AND FUNDAMENTAL RESEARCH

**Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ.**

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

**Журнал представлен в ведущих библиотеках страны и является рецензируемым.**

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

**Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,593.**

**Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,299.**

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

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

**ISSN 1996-3955**

Тел. редакции – 8-(499)-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 Е.Н. Доронкина  
Корректор Е.С. Галенкина, Н.А. Дудкина

Подписано в печать – 27.04.2024  
Дата выхода номера – 31.05.2024

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

Распространяется по свободной цене

Усл. печ. л. 4,0  
Тираж 500 экз.  
Заказ МЖПиФИ 2024/4

© ООО НИЦ «Академия Естествознания»

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

#### СТАТЬЯ

К ПРОБЛЕМЕ ПИТАНИЯ ИНОСТРАННЫХ СТУДЕНТОВ В ПЕРИОД  
АДАПТАЦИИ К РЕЗКО КОНТИНЕНТАЛЬНОМУ КЛИМАТУ ВОЛГОГРАДА

*Панченко Л.С.* ..... 5

#### НАУЧНЫЙ ОБЗОР

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ОСОБЕННОСТЯХ  
И БИОХИМИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМАХ ВЛИЯНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ  
АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ЗЕЛЕННОГО И ЧЕРНОГО ЧАЯ  
НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА

*Цикуниб А.Д., Шестопалова Д.И.* ..... 10

### ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

#### СТАТЬЯ

НЕКОТОРЫЕ МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ БЕРИЛЛА  
БЕЛОКУРИХИНСКОГО ПЛУТОНА ГОРНОГО АЛТАЯ

*Гусев А.И., Колыванова О.С.* ..... 16

### МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

#### СТАТЬЯ

ОСОБЕННОСТИ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ НЕСОВЕРШЕННОЛЕТНИХ СЕВЕРО-  
КАВКАЗСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА ОТ ТРАВМ И ВНЕШНИХ ПРИЧИН

*Кокушин Д.Н.* ..... 21

### ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

#### СТАТЬЯ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ НЕДНОРОДНОСТИ  
ТЕМПЕРАТУРЫ И ПЛОТНОСТИ В СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ БИНАРНОЙ СМЕСИ

*Емельянов В.М., Леднев А.К.* ..... 26

#### НАУЧНЫЙ ОБЗОР

ИНТЕГРАЦИЯ НЕНАЗЕМНОЙ СВЯЗИ (NTN) С 5G И ВЫШЕ

*Шепелев С.В., Бабин А.И., Коротков М.В.* ..... 31

### ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

#### СТАТЬЯ

ОБ ОДНОЙ СИСТЕМЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ВОЛЬТЕРРА  
ПЕРВОГО РОДА

*Сапарова Г.Б., Зулпукаров Ж.А.* ..... 36

---

## CONTENTS

### **BIOLOGICAL SCIENCES**

#### **ARTICLE**

TO THE PROBLEM OF NUTRITION OF FOREIGN STUDENTS DURING  
THE PERIOD OF ADAPTATION TO THE SHARPLY CONTINENTAL  
CLIMATE OF VOLGOGRAD

*Panchenko L.S.* ..... 5

#### **REVIEW**

MODERN VIEWS ABOUT THE FEATURES AND BIOCHEMICAL MECHANISMS  
OF THE INFLUENCE OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES OF GREEN  
AND BLACK TEA ON FUNCTIONAL CAPABILITIES AND HUMAN HEALTH

*Tsikunib A.D., Shestopalova D.I.* ..... 10

### **GEOLOGICAL AND MINERALOGICAL SCIENCES**

#### **ARTICLE**

SOME MINERAL-GEOCHEMISTRY ASPECTS OF BERYLL  
BELOKURICHINSKII PLUTON OF GORNY ALTAY

*Gusev A.I., Kolyvanova O.S.* ..... 16

### **MEDICAL SCIENCES**

#### **ARTICLE**

FEATURES OF INCIDENCE IN MINORS IN THE NORTH CAUCASUS  
FEDERAL DISTRICT FROM INJURIES AND EXTERNAL CAUSES

*Kokushin D.N.* ..... 21

### **TECHNICAL SCIENCES**

#### **ARTICLE**

NUMERICAL MODELLING OF RELAXATION OF TEMPERATURE AND  
DENSITY DISCONTINUITY IN A SUPERCRITICAL BINARY MIXTURE

*Emelyanov V.M., Lednev A.K.* ..... 26

#### **REVIEW**

INTEGRATION OF NON-TERRESTRIAL COMMUNICATION (NTN)  
WITH 5G AND ABOVE

*Shepelev S.V., Babin A.I., Korotkov M.V.* ..... 31

### **PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

#### **ARTICLE**

ABOUT ONE SYSTEM OF VOLTERRA INTEGRAL EQUATIONS  
OF THE FIRST KIND

*Saparova G.B., Zulpukarov Zh.A.* ..... 36

## СТАТЬЯ

УДК 612.015.3:613.3

**К ПРОБЛЕМЕ ПИТАНИЯ ИНОСТРАННЫХ СТУДЕНТОВ  
В ПЕРИОД АДАПТАЦИИ К РЕЗКО КОНТИНЕНТАЛЬНОМУ  
КЛИМАТУ ВОЛГОГРАДА****Панченко Л.С.***ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград,  
e-mail: Q9053959452@yandex.ru*

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема питания иностранных студентов в период адаптации к резко континентальному климату России, а также возможности педагогического сопровождения иностранных студентов в организации питания в этот период. Известно, что если вид питания мигрантов не соответствует климатогеографическим условиям проживания, то это вызывает состояние напряжения адаптационных механизмов организма, что может привести к развитию дезадаптационных процессов обмена веществ. Впервые предпринята попытка диагностики фактического питания иностранных студентов в первоначальный период проживания и обучения в условиях резко континентального климата Волгограда. Целью исследования является анализ соответствия фактического питания иностранных студентов климатогеографической среде Волгограда. Для достижения поставленной цели использованы методы анкетирования и интервьюирования 80 иностранных студентов первого года обучения, приехавших из стран ближнего и дальнего зарубежья. В результате исследования выявлены причины нарушения правил питания иностранными студентами в период адаптации к резко континентальному климату страны проживания и обучения, являющиеся факторами риска неудовлетворительной адаптации. С целью оптимизации сроков физиологической адаптации иностранных студентов разработаны медико-биологические рекомендации по коррекции их питания.

**Ключевые слова:** адаптация, иностранные студенты, коррекция питания, тропический климат, резко континентальный климат

**TO THE PROBLEM OF NUTRITION OF FOREIGN  
STUDENTS DURING THE PERIOD OF ADAPTATION  
TO THE SHARLY CONTINENTAL CLIMATE OF VOLGOGRAD****Panchenko L.S.***Volgograd State Technical University, Volgograd, e-mail: Q9053959452@yandex.ru*

**Annotation.** In the article is being considered the problem of nutrition of foreign students during the period of adaptation to the sharply continental climate of Russia, also possibilities pedagogical support of foreign students in organization of nutrition in this period. It is known, that if the view of migrant nutrition does not correspond to climatic and geographic conditions of accommodation, then this causes a state of tension in the body's adaptation mechanisms that may lead to the development of maladaptation processes of metabolism. First, a diagnostic attempt has been made the actual nutrition of foreign students in the initial period of accommodation and training in condition of sharply continental climate of Volgograd. Purpose of the study is to analyze compliance the actual nutrition of foreign students to climatic environment of Volgograd. To achieve this purpose, methods of questioning and interviewing were used of 80 foreign students first year of training, arrived from countries of near and far abroad. In result of study the cause of dietary violations has been identified by foreign students in period of adaptation to the sharply continental climate country of accommodation and training, are factors of risk unsatisfactory adaptation. In order to optimize timing physiological adaptation of foreign students biomedical recommendations in correction for their nutrition have been developed.

**Keywords:** adaptation, foreign students, correction of nutrition, tropic climate, sharply continental climate

Стратегической задачей развития интеллектуального потенциала российского общества является качественно модернизированная в соответствии с современными потребностями общества подготовка специалистов в вузах. В связи с этим увеличивается доля России на мировом рынке высшего профессионального образования. Ежегодно в вузах России обучаются иностранные студенты. Традиционно в вузах Волгограда получают высшее профессиональное образование иностранные студенты, приехавшие из стран ближнего и дальнего зарубежья.

Сегодняшний день обозначает ряд проблем в сфере экспорта образовательных услуг российскими вузами. Среди них первостепенной является адаптация иностранных студентов к непривычной климатогеографической среде проживания, незнакомому языку, новой культуре, другой образовательной системе. В случае неудовлетворительной адаптации отдельного ее вида происходит напряжение адаптационно-приспособительных механизмов организма, ведущее к дезадаптации. Р.М. Баевский считает, что «проявление болезни является результа-

том срыва адаптации...» [1, с. 122]. Следовательно, от своевременного решения проблем адаптации иностранных студентов зависит сохранение их здоровья, которое является основой качества профессиональной подготовки будущих специалистов для зарубежных стран.

Важным фактором оптимизации процессов физиологической адаптации организма иностранных студентов к условиям резко континентального климата России является питание. Как считает Н.А. Агаджанян, «фактор питания сыграл важную роль в эволюции человека, осуществляя важную прочную связь между организмом и окружающей средой. Обеспечение оптимального протекания процессов адаптации должно проходить с учетом оценки состояния метаболизма в конкретных климатогеографических и производственных условиях, уровня энерготрат и способности организма к ассимиляции пищи» [2, с. 129]. Н.А. Агаджанян указывает, что «согласно рекомендациям комитета по потребностям в калориях организма и вопросам пищевых продуктов и сельского хозяйства при ООН с понижением среднемесячной температуры на каждые 10°C калорийность питания должна увеличиваться на 5%, считая за исходные +10°C» [2, с. 130]. Исходя из указанного, питание иностранных студентов, не соответствующее климатогеографическим условиям проживания, может быть фактором риска их неудовлетворительной адаптации.

Питание – составной фактор адаптационного процесса организма иностранных студентов, являющийся источником энергии, обеспечивающим терморегуляцию организма.

Особенности питания иностранных студентов, обучающихся в непривычной климатогеографической среде, изучали немногие ученые. Среди них целесообразно указать на исследования в этой области соотечественников А.Е. Северина, Л.С. Панченко, изучающих физиологические аспекты особенностей питания индийских студентов, приехавших в Волгоград из разных штатов Индии. Авторы этого исследования рассматривают проблему адаптации индийских студентов к белково-липидной пище в зависимости от климата штата Индии, из которого они приехали [3, с. 61]. В научной работе психолого-педагогического направления А.Д. Иванова, Ж.С. Разриндзатуву считают, что одной из важных составляющих успешной адаптации академических мигрантов является преодоление кулинарных трудностей адаптации к русской пище [4]. Бхану Пилли и другие канадские исследователи диетических моделей иностран-

ных студентов в Канадском университете делают вывод о том, что проблема адаптации иностранных студентов к кухне другой страны заключается в том, что «ограниченные навыки в области питания, напряженный график работы, ограниченный доступ к привычным продуктам и фастфуды способствовали нездоровому образу питания» [5]. Автор настоящей статьи изучает и анализирует особенности адаптации иностранных студентов первого года обучения к русской пище, соответствующей условиям резко континентального климата Волгограда, также предприняла попытку разработки практических медико-биологических рекомендаций, направленных на оптимизацию сроков адаптации зарубежных студентов.

Цель исследования – определить особенности адаптации иностранных студентов первого года обучения к русской пище, выявить причины нарушения оптимальных сроков этого адаптационного процесса, разработать практические рекомендации, направленные на оптимизацию сроков адаптации зарубежных студентов к употреблению русской пищи.

#### **Материалы и методы исследования**

Исследование проведено на базе Волгоградского государственного технического университета в период с сентября 2023 г. по март 2024 г.. Для исследования сформированы две группы иностранных студентов первого года обучения, приехавших из стран ближнего и дальнего зарубежья, в общем количестве 80 чел. Для контрольного сравнения режима питания и состава пищи взяты нормативы питания жителей резко континентального климата. Для достижения цели исследования привлечены методы опроса, анкетирования и интервьюирования, а также метод педагогического наблюдения.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

Разработка педагогического сопровождения иностранных студентов первого года проживания в условиях резко континентального климата России возможна при диагностическом исследовании процесса адаптации, болезненным фактором которого является их питание. С этой целью было проведено анонимное анкетирование и интервьюирование 80 иностранных студентов подготовительного отделения факультета подготовки иностранных специалистов Волгоградского государственного технического университета. На основе анализа анкет и ответов участников получены обобщенные результаты, отраженные в табл. 1–6.

**Таблица 1**

Показатели соблюдения режима питания иностранными студентами первого года обучения в осенне-зимний период 2023 г. (%)

Количественный показатель приема пищи в сутки (разы)				
0 раз	2 раза	3 раза	4 раза	5 раз
0	66	18	10	6
Иностранные студенты (%)				

**Таблица 2**

Показатели соблюдения режима питания иностранными студентами первого года обучения в весенний период 2024 г. (%)

Количественный показатель приема пищи в сутки (разы)				
0 раз	2 раза	3 раза	4 раза	5 раз
0	53	30	15	2
Иностранные студенты (%)				

Известно, что в соответствии с медицинскими показателями частота приема пищи человеком строго индивидуальна, но в среднем должна быть не реже трех раз в сутки. Как следует из анализа показателей в табл. 1, 2, частота приема пищи в сутки иностранными студентами первого года обучения в весенний период исследования увеличивается, но у 53 % обследованных студентов отстает от медицинской нормы, что указывает на ряд причин, препятствующих правильной организации питания.

Важная роль в адаптации иностранных студентов к низким зимним температурам резко континентального климата Волгограда отводится питанию, так как в это время года увеличиваются энергетические затраты организма, поэтому важно обеспечить питание организма с максимальным содержанием в пище жиров животного происхождения. Липиды животного происхождения при окислении образуют больше энергии в виде тепла, чем белки и углеводы вместе взятые. При этом необходимо активное использование белков животного происхождения как строительного и энергетического материала. В процессе физиологической адаптации иностранных студентов к резко континентальному климату вовлекаются все виды метаболизма: белковый, жировой, углеводный, микроэлементный, витаминный и др. В период адаптации иностранных студентов к условиям резко континентального климата жизненно важен постепенный переход к употреблению белково-жировой пищи, обеспечивающей оптимальную терморегуляцию организма, не допускающую его переохлаждение.

Организм иностранных студентов, проживающих в тропическом климате, физиологически адаптирован к употреблению в основном пищи, содержащей преимущественно белки растительного происхождения и углеводы, выделяющие при окислении мало энергии, препятствующей перегреванию организма. К такой пище относятся следующие блюда тропических стран: хумус, манакши, табуле, кускус, бастурма и др.

Таким образом, при длительной адаптации к условиям резко континентального климата предусматривается постепенный переход к употреблению пищи белково-жирового состава животного происхождения с целью оптимизации сроков адаптации. К белково-жировой пище животного происхождения относятся следующие русские блюда: борщ, щи, суп-харчо, салат оливье, блины с мясом, блины и оладьи со сметаной, пироги и пирожки с мясом и рыбой, холодец, окрошка, пельмени и др.

Исследование темпов перехода иностранных студентов к употреблению русской пищи было произведено методом анкетирования и интервьюирования, в результате которого сделан расчет процента содержания русских блюд в рационе питания иностранных студентов и процентный расчет иностранцев, которые их употребляют в пищу в осенне-зимний и весенний периоды (табл. 3, 4).

Исходя из результатов исследования, указанных в табл. 3, 4, следует, что происходит постепенный переход у меньшей части иностранных студентов от уменьшения употребления белково-углеводной пищи, характерной для жителей тропиков, к пище

белково-липидного состава животного происхождения, употребляемой жителями резко континентального климата и увеличивающей теплосодержание организма в холодное время года. Этот переход не является оптимальным, что связано, видимо, с резким осенне-зимним понижением температуры среды и недостаточным пониманием иностранными студентами жизненной важности употребления белково-липидной пищи животного происхождения. Е.В. Калашникова считает, что причиной длительного перехода к употреблению пищи белково-липидного состава являются финансовые трудности, которые испытывают иностранные студенты в России [6, с. 138].

В организации рационального питания иностранных студентов в условиях адаптации к резко континентальному климату немалая роль отводится витаминам, активно участвующим в обмене веществ. Как известно, растительные продукты характеризуются повышенным содержанием витаминов. С этой целью при помощи анкетирования был сделан анализ содержания в пищевом рационе иностранных студентов овощей и фруктов (табл. 5, 6).

Известно, что витамины, содержащиеся в свежих овощах и фруктах, являются натуральными адаптогенами, оптимизирующими сроки адаптации. Причина недостаточного употребления свежих овощей и фруктов – отсутствие в Волгограде их разнообразия и высокая цена.

Состав и режим питания иностранцев к резко континентальному климату Волгограда часто ограничен соблюдением религиозных пищевых обрядов, среди которых отсутствие у мусульман возможности употребления в пищу свинины, сала, содержа-

щих жиры, а также во время мусульманского праздника Рамадана нарушение режима приема пищи и другие религиозные пищевые обряды.

**Таблица 3**

Показатели приема пищи русских блюд белково-липидного состава иностранными студентами первого года обучения в осенне-зимний период 2023 г. (%)

Содержание в составе пищи русских блюд (%)	Иностранные студенты, употребляющие этот состав пищи (%)
10	55
20	15
30	15
40	10
50	5

**Таблица 4**

Показатели приема пищи русских блюд белково-липидного состава (говяжья пельмени, салат оливье, блины со сметаной, говяжий борщ и др.) иностранными студентами первого года обучения в весенний период 2024 г. (%)

Содержание в составе пищи русских блюд (%)	Иностранные студенты, употребляющие этот состав пищи (%)
10	30
20	20
30	25
40	15
50	10

**Таблица 5**

Показатели употребления свежих овощей и фруктов иностранными студентами первого года обучения в осенне-зимний период 2023 г. (%)

Количество дней в неделю (дни)	1	2	3	4	Ежедневно
Число иностранных студентов, употребляющих овощи и фрукты (%)	30	35	20	10	5

**Таблица 6**

Показатели употребления свежих овощей и фруктов иностранными студентами первого года обучения в весенний период 2024 г. (%)

Количество дней в неделю (дни)	1	2	3	4	Ежедневно
Число иностранных студентов, употребляющих овощи и фрукты (%)	20	40	25	10	5

Важная роль в организации постепенно-го перехода иностранных студентов от белково-углеводного типа питания к белково-липидному типу питания принадлежит педагогическому коллективу, задача которого заключается в оказании помощи иностранным студентам в оптимизации сроков адаптации к резко континентальному климату Волгограда, помня о том, как подчеркивают Н.А. Аверьянова, Л.Ф. Белякова, Т.Л. Сидорова, что «многие студенты указывают о том, что сделали осознанный выбор учиться именно в Волгограде, прежде всего благодаря его героическому прошлому и всемирной славе» [7, с. 106].

### Заключение

Таким образом, исходя из результатов анонимного анкетирования и интервьюирования 80 иностранных студентов первого года обучения в Волгоградском государственном техническом университете, приехавших из разных стран, можно сделать вывод о том, что необходимо систематическое педагогическое сопровождение студентов-мигрантов в организации их правильного питания с целью оптимизации сроков адаптации к резко континентальному климату Волгограда. Для реализации успешной адаптации иностранных студентов в Волгоградском государственном техническом университете разработаны практические рекомендации, направленные на оптимизацию сроков адаптации зарубежных студентов, а также своевременное выявление и снижение факторов риска неудовлетворительной адаптации. Составляющей частью этих практических рекомендаций являются указания по коррекции питания иностранных студентов, составляющего основу адаптационных процессов в организме человека.

Основными положениями этих практических рекомендаций являются следующие:

- соблюдать режим питания;
- первое время проживания в условиях резко континентального климата Волгограда употреблять в преобладающем количестве пищу национальных блюд, к которой организм физиологически адаптирован, затем осуществлять постепенный переход к употреблению в пищу русских блюд;
- осуществлять постепенный переход от употребления в основном белково-углевод-

ной пищи, характерной для стран с тропическим климатом, к употреблению преимущественно пищи белково-липидного состава, характерной для стран с резко континентальным климатом, включая протеины и липиды животного происхождения;

- употреблять норму витаминов естественного или фармацевтического происхождения, являющихся признанными адаптогенами;

- употреблять в пищу натуральные продукты с маркировкой «100 % натурально» или «натурально»;

- при коррекции питания иностранных студентов к резко континентальному климату учитывать особенности религиозных пищевых обрядов.

Процесс адаптации иностранных студентов к резко континентальному климату Волгограда зависит от многих факторов, среди которых особенности питания в условиях этого климата. Успешная адаптация иностранных студентов предполагает создание условий для индивидуальной помощи каждому иностранному студенту в случае возникновения проблем. Оптимальные сроки адаптации иностранных студентов обеспечивают их качественную профессиональную подготовку и сохранение здоровья.

### Список литературы

1. Агаджанян Н.А., Баевский Р.М., Берсенева А.П. Проблемы адаптации и учение о здоровье: учеб. пособие. М.: Изд-во РУДН, 2006. 284 с.
2. Агаджанян Н.А., Торшин В.И. Экология человека. Избранные лекции. М.: КРУК, 1994. 256 с.
3. Северин А.Е., Панченко Л.С. Особенности питания иностранных студентов в условиях адаптации к резко континентальному климату России // Вести Волгоградского государственного университета. 2014. № 2 (8). С. 58–62.
4. Иванова А.Д., Разриндзатува Ж.С. Проблемы психолого-педагогической адаптации иностранных студентов в России // Научное обозрение. Педагогические науки. 2017. № 4. С. 57–61.
5. Bhanu Pilli et al. Food Experience and Dietary Patterns of International students at a Canadian University. Bhanu Pilli MSc et al. Can J Diet Pract Res. 2021.
6. Калашникова Е.В. Проблемы адаптации иностранных студентов в России // Вестник ТвГУ. Серия «Педагогика и психология». 2018. Вып. 1. С. 133–140.
7. Аверьянова Н.А., Белякова Л.Ф., Сидорова Т.Л. Образ России «на рубеже времен» в конкурсных эссе иностранных студентов // PRIMO ASPECTU. 2023. № 1 (53). С. 101–126.

## СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ОСОБЕННОСТЯХ И БИОХИМИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМАХ ВЛИЯНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ЗЕЛЕННОГО И ЧЕРНОГО ЧАЯ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА

Цикуниб А.Д., Шестопалова Д.И.

ФГБОУ ВО «Адыгейский государственный университет», Майкоп, e-mail: cikunib58@mail.ru

**Аннотация.** Целью обзора явился анализ современных представлений об особенностях и биохимических механизмах влияния биологически активных веществ зеленого и черного чая на организм человека. Поиск научных данных проведен по открытым электронным наукометрическим базам данных eLIBRARY и PubMed. Глубина поиска – 2018–2023 гг. Показано, что современные исследования влияния БАВ чая на функциональные возможности организма и здоровье человека можно классифицировать по двум направлениям: 1) исследования, посвященные изучению положительного влияния БАВ и 2) исследования, посвященные изучению негативного влияния БАВ чая при его избыточном потреблении. Выявлены особенности и обсуждены биохимические механизмы как позитивного, так и негативного влияния БАВ зеленого и черного чая на функциональные возможности и здоровье человека в зависимости от уровня потребления. Показано, что ПФО-ферментация как метод обработки чая существенно влияет на химический состав и функциональные свойства черного чая, делая его более безопасным, чем зеленый ферментированный чай. Заключается, что различия в химическом составе и функциональной активности БАВ зеленого и черного чая определяют необходимость подбора как вида чая, так и оптимальных уровней его потребления в зависимости от индивидуальных особенностей и функционального состояния организма.

**Ключевые слова:** зеленый чай, черный чай, функциональные свойства БАВ чая, ПФО-ферментация, позитивное влияние чая, негативное влияние чая

## MODERN VIEWS ABOUT THE FEATURES AND BIOCHEMICAL MECHANISMS OF THE INFLUENCE OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES OF GREEN AND BLACK TEA ON FUNCTIONAL CAPABILITIES AND HUMAN HEALTH

Tsikunib A.D., Shestopalova D.I.

Adyghe State University, Maykop, e-mail: cikunib58@mail.ru

**Annotation.** The purpose of the review was to analyze modern ideas about the characteristics and biochemical mechanisms of the influence of biologically active substances of green and black tea on the human body. The search for scientific data was carried out using open electronic scientometric databases eLIBRARY and PubMed. Search depth – 2018–2023 It is shown that modern research into the influence of biologically active substances in tea on the functionality of the body and human health can be classified in two directions: 1) studies devoted to the study of the positive effects of biologically active substances and 2) studies devoted to the study of the negative effects of biologically active substances in tea when consumed in excess. The features and biochemical mechanisms of both positive and negative effects of biologically active substances of green and black tea on human functionality and health, depending on the level of consumption, have been identified and discussed. It has been shown that PPO fermentation, as a tea processing method, significantly affects the chemical composition and functional properties of black tea, making it safer than unfermented green tea. It turns out that differences in the chemical composition and functional activity of biologically active substances in green and black tea determine the need to select both the type of tea and the optimal levels of its consumption, depending on the individual characteristics and functional state of the body.

**Keywords:** green tea, black tea, functional properties of biologically active substances in tea, PPO fermentation, positive effects of tea, negative effects of tea

Одним из наиболее популярных напитков во всем мире является чай, который производится из обработанных листьев чайного растения (*Camellia sinensis*). В зависимости от биотехнологии производства существуют различные типы чая, наиболее распространенными из которых являются зеленый (неферментированный) и черный (ферментированный) [1]. Степень ферментации зеленого чая (ЗЧ) составляет не более 3–12%, а черного чая (ЧЧ) – 70–85%. Ферментация чая происходит под действием

полифенолоксидазы (ПФО-ферментация), которая окисляет полифенолы до о-хинонов с образованием соответствующих окрашенных продуктов реакции. Общее содержание полифенолов в зеленом и черном чаях практически одинаково, однако под воздействием процесса обработки присутствуют разные типы флавоноидов [2]. Так, основными биологически активными веществами (БАВ) ЗЧ являются катехины: эпикатехин (ЭК), эпикатехин-3-галлат (ЭКГ), эпигаллокатехин (ЭГК) и эпигаллокатехин-

3-галлат (ЭГКГ), с преобладанием ЭГКГ [3, 4], а основными БАВ ЧЧ являются теафлавины (ТФ) и крупные полимерные соединения, такие как теарубигины (ТР) [5]. ТФ и ТР способствуют уникальному вкусу и цвету ЧЧ благодаря содержащимся в них бензотрополон-связанным гетеродимерам катехинов [6]. Из-за своей более высокой молекулярной массы ТР недостаточно исследованы химически и биохимически. По сравнению с ЗЧ, ЧЧ содержит меньшее количество мономерных полифенолов и большее количество полимерных соединений [7]. Изучению биохимических механизмов влияния БАВ на функциональные свойства ЗЧ и ЧЧ в научной литературе уделяется все большее внимание, однако накопленная информация требует более четкой систематизации в части как позитивного, так и возможного негативного влияния ЧЧ и ЗЧ на организм человека, что определило актуальность, цель и задачи нашего исследования. Цель исследования – анализ и систематизация современных представлений об особенностях и биохимических механизмах влияния биологически активных веществ зеленого и черного чая на организм человека.

#### Материалы и методы исследования

Поиск научных данных проведен по открытым электронным базам данных eLIBRARY и PubMed. Для поиска использовали ключевые слова. Глубина поиска – 2017–2023 гг. Для проведения анализа и оценки литературных данных были определены критерии включения источников в исследование и исключения из исследования. Критерии включения источников в исследование: наличие полнотекстовых источников. Критерии исключения источников из исследования: исследования, направленные на изучение других видов чая; исследования, имеющие признаки «дублирования». В случае обнаружения «дублирующих» статей выбирали более поздний по дате публикации источник.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Благодаря высокому уровню содержания и разнообразию БАВ разные виды чая, как зеленый, так и черный, оказывают существенное влияние на функциональные возможности организма и здоровье человека (рис. 1, а и б).

Сравнительный анализ показывает, что и ЗЧ, и ЧЧ в той или иной степени обладают противораковой активностью, что обусловлено ингибированием под действием ЭГКГ пролиферации и метастазирования

опухоли, стимулированием им клеточного апоптоза и подавлением мутагенов [8], а кофеин также может оказывать ингибирующее действие на рост опухолевых клеток, увеличивая внутриклеточный цАМФ [9]. У женщин в постменопаузе БАВ ЗЧ могут снизить риск рака щитовидной железы [10]. Биохимической основой антиоксидантной активности как ЗЧ, так и ЧЧ является снижение под действием катехинов уровня АФК, усиление активности антиоксидантных ферментов, включая супероксиддисмутазу в печени [11]. По данным Fu Q.U. с соавт. [12] флавоноиды ЗЧ и ЧЧ снижают риск развития СД2, имитируя действие инсулина, а ЭГКГ предотвращает повреждение бета-клеток поджелудочной железы. БАВ чая снижают риск алиментарного ожирения: катехины усиливают окисление жиров, а полифенолы подавляют аппетит и снижают усвоение питательных веществ из рациона за счет подавления активности генов, кодирующих синтез орексигенных факторов; способствуют преимущественному поступлению глюкозы в мышцы для использования в качестве источника энергии [13]. Полифенолы чая обладают антимикробной активностью [14], ингибируя синтез жирных кислот клеточной стенки бактерий, способствуют разрушению клеточной мембраны микробов. Теафлавины ЧЧ благодаря большому количеству ОН-групп проявляет хелатирующую активность к ионам тяжелых металлов, в частности ионам меди [15]. Несмотря на то, что эффекты позитивного влияния на функциональные возможности организма и здоровье человека БАВ ЗЧ и ЧЧ схожи, все же большинство авторов признают, что из всех видов чая ЗЧ обладает лучшим антиоксидантным эффектом, а ЧЧ – лучшей хелатирующей активностью.

Чай является полезным напитком, но при условии адекватного потребления. Недавние исследования показывают, что после приема большого количества чая, особенно ЗЧ (более 3–5 чашек/день), появляются нежелательные побочные эффекты из-за негативного влияния высокого уровня БАВ на функциональные возможности и здоровье человека (рис. 2, а и б).

При высоких концентрациях катехинов чай проявляет цитотоксичность, преимущественно гепатотоксичность [16], что обусловлено образованием активных форм кислорода и разрушением митохондриальных мембран, сопровождающихся воспалительными инфильтратами, некрозом и стеатозом, выраженным повышением уровня ферментов печени в сыворотке крови.

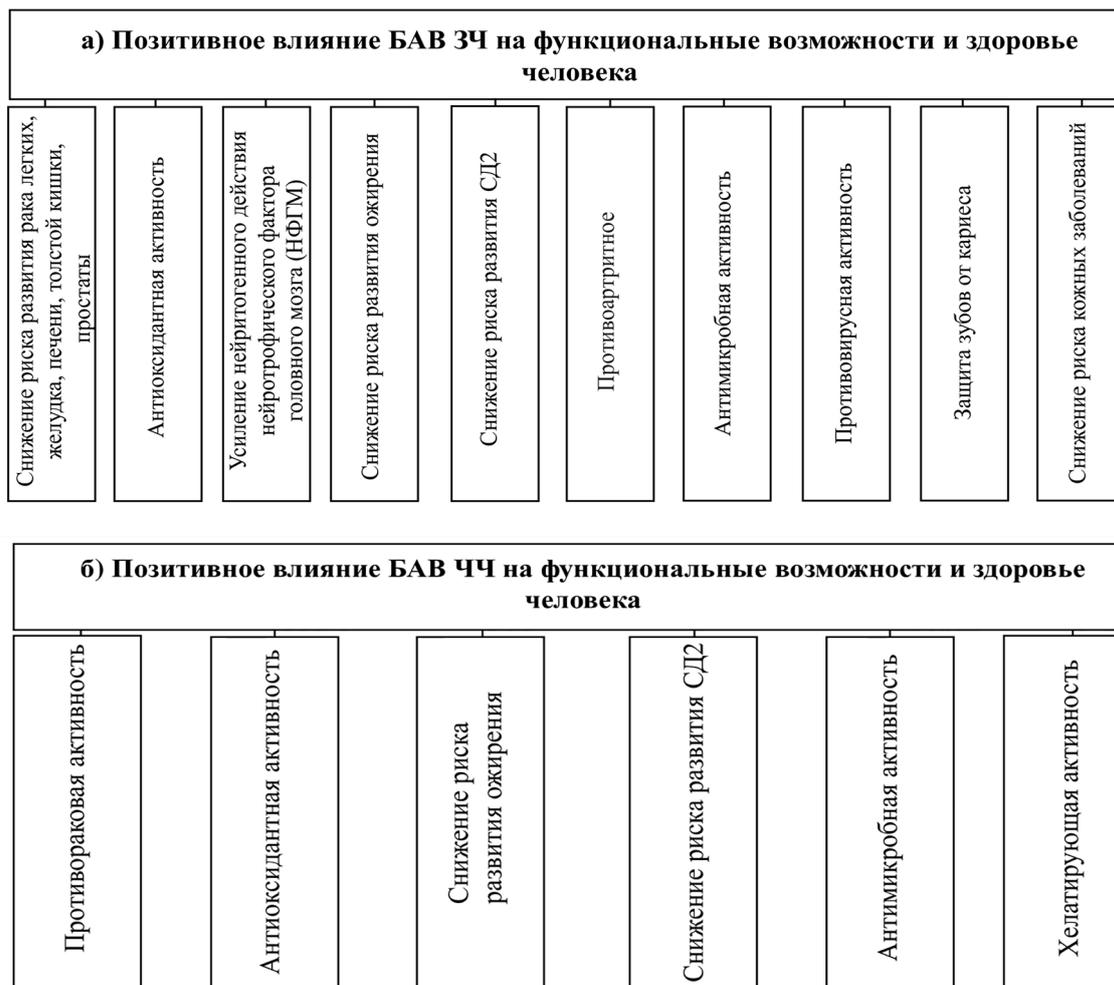


Рис. 1. Позитивное влияние БАВ а) ЗЧ и б) ЧЧ на функциональные возможности и здоровье человека

Флавоноиды чая обладают мощной антигипертензивной активностью, значительно снижают уровни Т3 и Т4 в сыворотке крови со значительным повышением уровня ТТГ [17], а катехины в высоких концентрациях могут увеличить риск рака ЩЖ у женщин в пременопаузе, воздействуя на рецептор альфа-эстрогена, который не обнаруживается в нормальных клетках ЩЖ, но присутствует в клетках рака ЩЖ [18]. Негативное влияние избыточного потребления чая на функцию почек связано с тем, что кофеин, увеличивая высвобождение простагландинов, АТФ, ацетилхолина и оксида азота из уротелия, способствует усилению чувствительности мочевого пузыря и симптомам гиперактивного мочевого пузыря, а также может уменьшать объем мочевого пузыря и повышать чувствительность к его наполнению [19].

При избыточном потреблении чая кофеин может вызвать целый ряд нежела-

тельных побочных эффектов. Так, в количестве более 80–87 мг кофеин, стимулирует нервную систему, ухудшает качество сна, вызывает бессонницу, гнев и беспокойство, тремор, головокружение и спутанность сознания, уменьшение мозгового кровотока, увеличение тревожности [20, 21]; в дозе выше 10 мг/кг/день ингибирует фосфодиэстеразу, вызывает нерегулярный сердечный ритм, уменьшает сердечное наполнение и снижает сердечный выброс, что приводит к вазодилатации и гипотонии, а также – тахикардии [22]. Избыток кофеина может вызывать гипокалиемию из-за бета-2-адренергического агонизма, вызванного высвобождением катехоламинов, из-за ингибирования фосфодиэстеразы или антагонизма аденозина [23]. Кофеин при чрезмерном употреблении может негативно повлиять на мужскую репродуктивную систему, повреждая ДНК сперматозоидов [24].

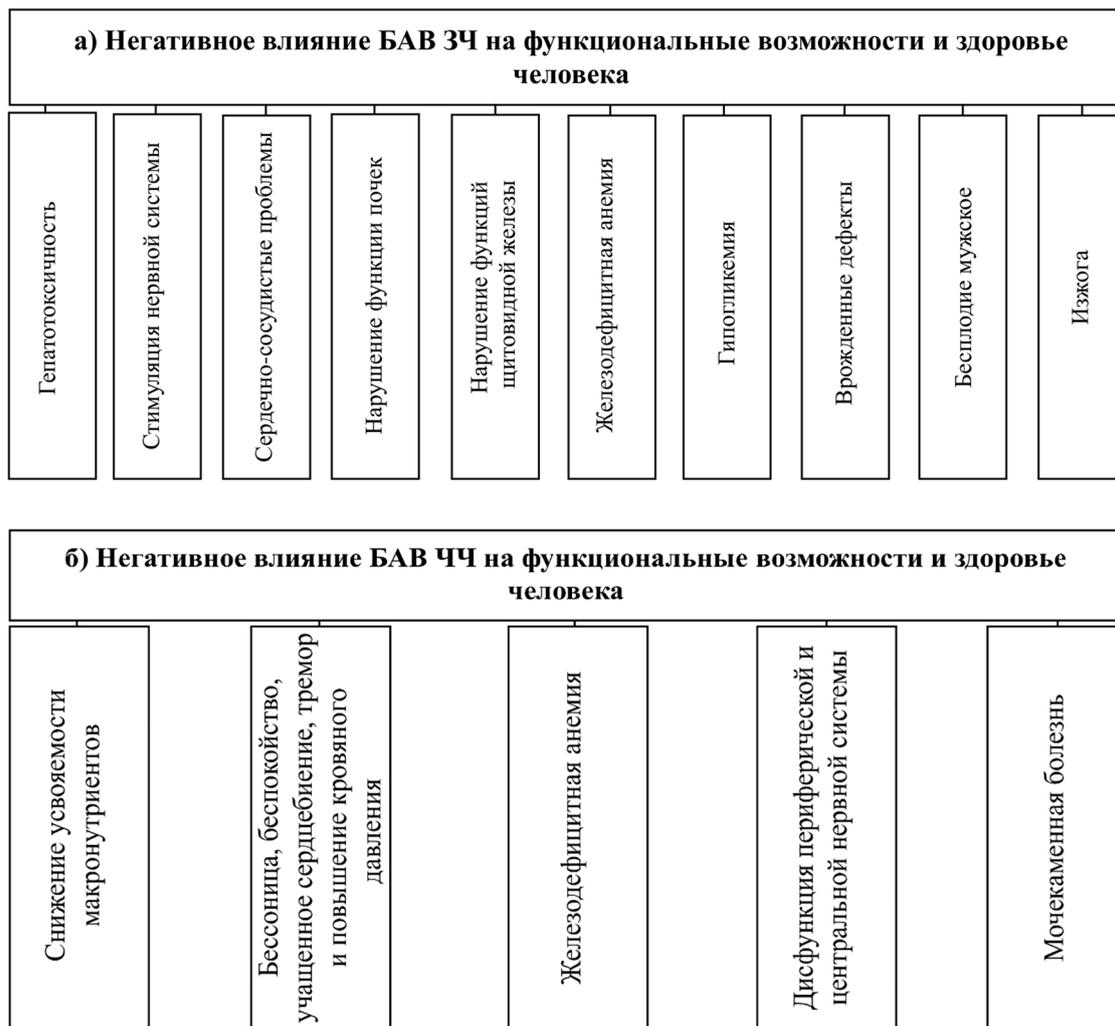


Рис. 2. Негативное влияние БАВ а) ЗЧ и б) ЧЧ на функциональные возможности и здоровье человека

По данным ряда авторов [25–27], при регулярном избыточном потреблении чая, особенно ЗЧ, ряд БАВ, в частности катехин, ЭГКГ и кофеин, могут вызывать врожденные дефекты. Так, катехин, снижая биодоступность витамина В9, проявляет антифолатное действие и высокий риск развития расщелины позвоночника у плода [26, 28]; ЭГКГ может ингибировать дигидрофолатредуктазу и снижать уровень витамина В9 в сыворотке крови [29], а кофеин, не только снижает биодоступность и повышает скорость выведения из организма фолиевой кислоты, но и легко проникает через плацентарный барьер, вызывая снижение плацентарного кровоснабжения плода и влияя на его рост [25, 30]. Людям, у которых наблюдается дефицит железа или предрасположенность к дефициту железа, а таковых по данным ряда авторов более миллиарда человек во всем мире [18, 31], же-

лательно минимизировать потребление чая или использовать другие напитки.

Аналитический материал показывает, что ПФО-ферментация, как метод обработки чая, снижает, в сравнении с ЗЧ, возможность негативного влияния ЧЧ на организм при избыточном потреблении, однако из-за высокой хелатирующей способности его потребление особенно нежелательно при скудном питании с дефицитом важнейших макро- и микроэлементов, в особенности белка и железа [32], так как ТР и ТФ, ингибируя пищеварительные ферменты, включая трипсин, липазу, амилазу и глюкозидазу, могут приводить к снижению доступности этих питательных веществ [33], а при избыточном питании с высоким содержанием макроэлементов, в особенности жиров и углеводов, наоборот, потребление ЧЧ может быть рекомендовано [34].

### Заключение

Чай относится к напиткам с широким спектром БАВ, обладающих при небольших концентрациях высокой физиологической активностью и позитивным влиянием на функциональные возможности организма и здоровье человека. Сравнительный анализ научных данных показывает, что БАВ как ЗЧ, так и ЧЧ в той или иной степени выраженности обладают противораковой, антиоксидантной, антимикробной и хелатирующей активностями, снижают риск развития СД2 и алиментарного ожирения. Однако прием большого количества чая, особенно ЗЧ, может привести к нежелательным побочным эффектам, таким как гепатотоксичность, сердечно-сосудистые проблемы, нарушение функции почек и щитовидной железы, железодефицитная анемия, гипокалиемия, врожденные дефекты и бесплодие. ПФО-ферментация, как метод обработки чая, существенно влияет на химический состав и функциональные свойства ЧЧ, делая его более безопасным, но тем не менее избыточное потребление ЧЧ может приводить к бессоннице, беспокойству, учащенному сердцебиению, тремору, повышению кровяного давления, дисфункции периферической и центральной нервной систем, снижению усвояемости макронутриентов, железодефицитной анемии, мочекаменной болезни. Различия в химическом составе и функциональной активности БАВ ЗЧ и ЧЧ определяют необходимость индивидуального подбора как вида чая, так и оптимальных уровней его потребления в зависимости от индивидуальных особенностей и функционального состояния организма.

### Список литературы

1. Qin H., Huang L., Teng J., Wei B., Xia N., Ye Y. Purification, characterization, and bioactivity of Liupao tea polysaccharides before and after fermentation // *Food chemistry*. 2021. Vol. 353. P. 129419.
2. Shi J., Yang G., You Q., Sun S., Chen R., Lin Z., Simal-Gandara J., Lv H. The latest information on the chemical composition, processing characteristics and use of tea flavonoids over the past two decades (2001–2021) // *Critical reviews in the field of food science and dietetics*. 2023. Vol. 63, Is. 20. P. 4757–4784.
3. Musial C., Kuban-Jankowska A., Gorska-Ponikowska M. Beneficial Properties of Green Tea Catechins // *Int. J. Mol. Sci.* 2020. Vol. 21, Is. 25. P. 1744.
4. Kochman J., Jakubczyk K., Antoniewicz J., Mruk H., Janda K. Health Benefits and Chemical Composition of Matcha Green Tea: A Review // *Molecules*. 2021. Vol. 26, Is. 1. P. 85.
5. Samantha S. Potential bioactive components and beneficial properties of tea (*Camellia sinensis*) for health promotion // *Journal of the American Nutrition Association*. 2022. Vol. 41, Is. 1. P. 65–93.
6. Wong M., Sirisena S., Ng K. Phytochemical profile of tea of various processing: a review // *Journal of Food Science*. 2022. Vol. 87, Is. 5. P. 1925–1942.
7. Tanaka T., Matsuo Y. Production mechanisms of black tea polyphenols // *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*. 2020. Vol. 68, Is. 12. P. 1131–1142.
8. Negri A., Naponelli V., Rizzi F., Bettuzzi S. Molecular targets of epigallocatechin gallate (EGCG): special emphasis on signal transmission and cancer // *Nutrients*. 2018. Vol. 10, Is. 12. P. 1936.
9. Tedj G.N.V.K., Nayak P.K. Mechanistic considerations on the chemotherapeutic activity of caffeine // *Biomedicine and pharmacotherapy*. 2018. Vol. 105. P. 312–319.
10. Zamora-Ros R., A-Alghamdi M., Cayssials V., Franceschi S., Almqvist M., Hennings J., Sandström M., Tsilidis K.K., Weiderpass E., Boutron-Ruault M.C., Bech B.H., Overvad K., Tjønneland A., Petersen K.E., Mancini F.R., Mahamat-Saleh Y., Bonnet F., Kühn T., Fortner R.T., Boeing H., Trichopoulou A., Bamia C., Martimianaki G., Masala G., Grioni S., Panico S., Tumino R., Fasanelli F., Skeie G., Braaten T., Lasheras C., Salamanca-Fernández E., Amiano P., Chirlaque M.D., Barricarte A., Manjer J., Wallström P., Bueno-de-Mesquita H.B., Peeters P.H., Khaw K.T., Wareham N.J., Schmidt J.A., Aune D., Byrnes G., Scalbert A., Agudo A., Rinaldi S. The effect of coffee and tea consumption on the risk of differentiated thyroid carcinoma: results of the European Prospective Study of Cancer and Nutrition (EPIC) // *European Journal of Nutrition*. 2019. Vol. 58. P. 3303–3312.
11. Xu X.Y., Zheng J., Meng J.M., Gan R.Y., Mao Q.Q., Shang A., Li B.Y., Wei X.L., Li H.B. The effect of food processing on the antioxidant and hepatoprotective properties of green tea extracts in vivo // *Antioxidants*. 2019. Vol. 8, Is. 12. P. 572.
12. Fu Q.Y., Li Q.S., Lin X.M., Qiao R.Y., Yang R., Li X.M., Dong Z.B., Xiang L.P., Zheng X.Q., Lu J.L., Yuan C.B., Ye J.H., Liang Y.R. Antidiabetic Effects of Tea // *Molecules*. 2017. Vol. 22, Is. 5. P. 849.
13. Imran A., Arshad M.U., Arshad M.S., Imran M., Saeed F., Sohaib M. Lipid peroxidation diminishing perspective of isolated theaflavins and thearubigins from black tea in arginine induced renal malfunctioned rats // *Lipids in Health and Disease*. 2018. Vol. 17. P. 1–12.
14. Yang Yu., Zhang T. Antimicrobial activity of tea polyphenol against phytopathogens: a review // *Molecules*. 2019. Vol. 24, Is. 4. P. 816.
15. Sharma N., Phan H.T., Chikae M., Takamura Y., Azo Oussou A.F., Vestergaard M.C. Black tea polyphenol theaflavin as promising antioxidant and potential copper chelator // *Journal of the science of food and agriculture*. 2020. Vol. 100, Is. 7. P. 3126–3135.
16. Baldi A., Abramovic H., Ulrih N.P., Daglia M. Tea catechins. Handbook of dietary phytochemicals. 2019. P. 1–46.
17. Pistollato F., Masias M., Agudo P., Giampieri F., Battino M. The effect of phytochemicals on thyroid function and their possible role in thyroid diseases // *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2019. Vol. 1443, Is. 1. P. 3–19.
18. Tang G.Y., Meng X., Gan R.Y., Zhao C.N., Liu Q., Feng Y.B., Li S., Wei X.L., Atanasov A.G., Corke H., Li H.B. Health Functions and Related Molecular Mechanisms of Tea Components: An Update Review // *International Journal of Molecular Sciences*. 2019. Vol. 20, Is. 24. P. 6196.
19. Averbek M.A., Goldman H.B. Pathophysiology of overactive bladder // *Modern pharmacotherapy of an overactive bladder*. 2019. P. 1–12.
20. Van Koert R.R., Bauer P.R., Schuitema I., Sander J.W., Visser G.H. Caffeine and seizures: A systematic review and quantitative analysis // *Epilepsy Behav.* 2018. Vol. 80. P. 37–47.
21. Zhao B. The pros and cons of drinking tea // *Traditional Medicine and Modern Medicine*. 2020. Vol. 3, Is. 3. P. 163–174.
22. Turnbull D., Rodricks J.V., Mariano G.F., Chowdhury F. Caffeine and cardiovascular health // *Regul Toxicol Pharmacol*. 2017. Vol. 89. P. 165–185.
23. Toya N., Isokawa S., Suzuki A., Otani N., Ishimatsu S. Bidirectional ventricular tachycardia induced by caffeine poisoning // *The American Journal of Emergency Medicine*. 2019. Vol. 37, Is. 11. P. 2118.

24. Kumar M., Zilate S., Gupta C. The effect of stress and caffeine on male infertility // *Cureus*. 2022. Vol. 14, Is. 8. DOI: 10.7759/cureus.28487.
25. Qian J., Chen Q., Ward S.M., Duan E., Zhang M.Y. The effects of caffeine during pregnancy // *Trends in endocrinology and metabolism*. 2020. Vol. 31, Is. 3. P. 218–227.
26. Afzal O., Dalhat M.H., Altamimi A.S.A., Rasool R., Sami I. Alzarea S.I., Almalki W.H., Murtaza B.N., Ifikhar S., Nadeem S., Nadeem M.S., Kazmi I. Green Tea catechins reduce neurodegenerative diseases and cognitive deficits // *Molecules*. 2022. Vol. 27, Is. 21. P. 7604.
27. Khaleel A., Shaari R.B., Nawi M., A-Yassiri A. The Adverse effects of Green Tea on Public Health: The Untold Story of Medicine // *Sys Rev Pharm*. 2020. Vol. 11. P. 883-887.
28. Sidhu D., Vasundhara M., Day P. Metabolic benefits of green tea catechins at the intestinal level: mechanistic conclusions from preclinical and clinical studies // *Phytomedicine*. 2023. P. 155207.
29. Saeki K., Hayakawa S., Nakano S., Ito S., Oishi Y., Suzuki Y., Isemura M. In vitro and in silico studies of the molecular interactions of epigallocatechin-3-O-gallate (EGCG) with proteins explaining the health benefits of green tea // *Molecules*. 2018. Vol. 23, Is. 6. P. 1295.
30. Patel P.H., Burrow K.A. Physiological, cognitive effects and influence on the development of prenatal caffeine consumption on fetal pregnancy outcomes // *Student studies in the Journal of Natural and Clinical Sciences and Technologies*. 2023. Vol. 7. P. 1–12.
31. Lazrak M., Kari K.E., Stoffel N.U., Elammari L., Al-Jawaldeh A., Loechl C.U., Yahyane A., Barkat A., Zimmermann M.B., Aguenau H. Tea consumption reduces iron bioavailability from NaFeEDTA in nonanemic women and women with iron deficiency anemia: Stable iron isotope studies in Morocco // *The Journal of Nutrition*. 2021. Vol. 151, Is. 9. P. 2714–2720.
32. Arya P., Dabra A., Guarve K. Green tea: Chemical composition, biological effects and health benefits // *Asian Journal of Pharmacy and Pharmacology*. 2019. Vol. 5, Is. 2. P. 227–234.
33. Chen T., Yang K.S. Biological destinies of tea polyphenols and their interaction with the microbiota of the gastrointestinal tract: impact on health // *Critical reviews in the field of food science and dietetics*. 2020. Vol. 60, Is. 16. P. 2691–2709.
34. Naveed M., BiBi J., Kamboh A.A., Suheryani I., Kakar I., Fazlani S.A., FangFang X., Yunjuan L., Kakar M.U., El-Hack M.E.A., Noreldin A.E., Zhixiang S., Xia C.L., Hui Z.X. Pharmacological value and therapeutic properties of black tea (*Camellia sinensis*): a comprehensive review // *Biomedicine and pharmacotherapy*. 2018. Vol. 100. P. 521–531.

## СТАТЬЯ

УДК 549.2/.8:548

**НЕКОТОРЫЕ МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
БЕРИЛЛА БЕЛОКУРИХИНСКОГО ПЛУТОНА ГОРНОГО АЛТАЯ****Гусев А.И., Колыванова О.С.***ФГБОУ ВО «Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет  
имени В.М. Шукшина, Бийск, e-mail: anzerg@mail.ru*

**Аннотация.** В статье приведены данные о геохимических особенностях и генезисе берилла пегматитов и грейзенов Белокурихинского плутона Алтайского края. В пегматитах берилл ассоциирует с минералами группы тантало-ниобатов и сульфидов (халькопирита, молибденита), а в грейзенах парагенезис охватывает танталит, молибденит, флюорит. Различные цвета берилла объясняются наличием в изумрудно-зеленом берилле пегматитов присутствием повышенных концентраций хрома, ванадия, скандия, а также ионов  $Fe^{3+}$ . Грейзеновый берилл отличается повышенными концентрациями Li, Cs, Rb, обусловленными изоморфизмом по другой схеме, когда замещение  $Al^{3+}$  двухвалентным Fe происходило с компенсацией заряда. В обеих разновидностях берилла отмечается высокое отношение  $(La/Yb)_N$ , свидетельствующее о сильно дифференцированном фракционировании тяжелых и легких лантаноидов. По оценке условного потенциала ионизации берилла установлено, что кристаллизация изумруда в пегматитах происходила в условиях кислотной среды, а берилла грейзенов – основной среды минералообразования. В берилле пегматитов проявлен W-тип тетрадного эффекта фракционирования редкоземельных элементов (ТЭФ РЗЭ), свидетельствующего о высокой активности аквакомплексов. Грейзеновый берилл характеризуется проявлением M- и W-типа ТЭФ РЗЭ, указывающих на активность и фтораквакомплексов. В зональной колонне грейзены занимают более высокое положение, чем пегматиты.

**Ключевые слова:** Горный Алтай, берилл, пегматиты, грейзены, элементы-примеси, тетрадный эффект фракционирования РЗЭ

**SOME MINERAL-GEOCHEMISTRY ASPECTS OF BERYLL  
BELOKURICHINSKII PLUTON OF GORNY ALTAJ****Gusev A.I., Kolyvanova O.S.***V.M. Shukshin Altai State University for Humanities and Pedagogy, Biysk,  
e-mail: anzerg@mail.ru*

**Annotation.** Data about geochemistry peculiarities and genesis of beryl pegmatites and greizens Belokurichinskii pluton of Altai region lead in paper. Beryl in pegmatites associated with minerals of tantalium-niobium group and sulfides (chalcopyrite, molybdenite), but in greizens paragenesis enveloped tantalite, molybdenite, fluorite. The different of colours of beryl explain by presence in emerald – green beryl of pegmatites by presence high concentration of chromium, vanadium, scandium and so ions of  $Fe^{3+}$ . The greisen beryl distinguish high concentrations Li, Cs, Rb, conditional by isomorphism on other scheme, when substitution  $Al^{3+}$  two valency Fe took place with compensation of charge. High ratio of  $(La/Yb)_N$ , in both varieties beryl evidence about strongly differentiation fractionation of hard and light lanthanoids. Crystallization of emerald in pegmatites happen in conditions of acidic environment, but of beryl in greizens – in basic surroundings mineral forming on estimate conditional potential ionization. W – type tetradic fractionation of rare earth elements (TEF REE), testifying about activity aqua-complexes in beryl of pegmatites. Greizen beryl characterized by displaying of M – and W-type TEF REE, showing on activity of fluor – and aqua-complexes.

**Keywords:** Gorny Altai, beryl, pegmatites, greizens, element-admixtures, tetradic effect fractionation of REE

Берилл с идеальной формулой  $Be_3Al_2Si_6O_{18}$  является источником бериллия, который используется преимущественно в сплавах с другими металлами для получения легковесных и прочных сталей, а также в ядерной промышленности в качестве экрана электромагнитного излучения и высокотехнологичных решениях при создании ракетных двигателей, аппаратов медицинской диагностики [1–4]. Бериллий относится в России к группе стратегических и дефицитных металлов, запасы которых находятся на грани исчерпания. В Китае Be рассматривается как стратегический и критический металл [3]. Берилл чаще всего встречается в гранитных пегматитах

[5], в грейзенах и флюорит-бертрандитовом типе месторождений в экзоконтактах гранитоидов щелочного ряда [6]. В гранитных пегматитах берилл может формировать идиоморфные кристаллы размерами от миллиметров до более чем 10 м в длину (например, в пегматитах Мадагаскара) [7]. Кристаллическая структура берилла содержит округлые слои с шестью Si-O тетраэдрами, которые связаны вертикально и латерально Be-O тетраэдрами и Al-O октаэдрами [8–11].

Актуальность исследования берилла Белокурихинского плутона определяется тем, что в его пределах присутствуют и грейзеновые месторождения, и пегматитовые про-

явления с алюмосиликатом бериллия, которые представляют промышленный интерес.

Цель исследования – провести геохимические исследования и сравнить особенности состава берилла из различных геолого-промышленных типов оруденения, а также определить его генезис.

#### Материалы и методы исследования

Кроме петрографического и минералогического методов исследований использовалось определение редких элементов в монофракциях берилла эмиссионной спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре «ОПТИМА-4300», для Cu, Zn, Pb, Li, – методом ISP-AES в Центральных лабораториях ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург).

#### Результаты исследования и их обсуждение

В пределах Белокурихинского плутона берилл встречается в пегматитах и грейзенах. При этом грейзены в вертикальной зональности распространения минерализации локализуются выше пегматитов. Наиболее представительными объектами в этом районе являются проявления пегматитов ручья Белый Камень и грейзеновое Курановское месторождение.

Пегматитовое проявление ручья Белый Камень приурочено к Агеевской тектонической зоне и локализовано в биотитовых порфиридных гранитах Белокурихинского массива. Пегматитовая жила мощностью 0,5–1,9 м и протяженностью более 40 м. Центральная часть жилы сложена белым плотным кварцем с редкой вкрапленностью молибденита и халькопирита. Она разрабатывалась как стекольное сырье. В западной части жилы, где кварцевое ядро довольно резко выклинивается, встречено гнездовое оруденение берилла и тантал-ниобатов. Берилл и тантал-ниобаты наблюдаются в виде отдельных кристаллов величиной 1,5–7 см в поперечнике при длине 15 см и друз от 2 до 12 см в поперечнике, состоящих из кристаллов 1,5–2 см длиной и толщиной 1,5–2 мм. Берилл желтовато-зеленого цвета и зеленого, близкого к изумруду. Редко встречаются кристаллы настоящего изумруда.

Грейзеновое Курановское месторождение приурочено к штоку лейкогранитов и представлено штокверком жил и прожилков кварца с мусковитом, сопровождающихся грейзенами. Наибольшая концентрация берилла приурочена преимущественно к местам пересечения субмеридиональных и субширотных жил и прожилков. Кроме берилла прожилки содержат флюорит, молибденит, танталит. Берилл присутствует

в виде неравномерной вкрапленности призматических кристаллов зеленовато-голубого цвета, длиной от долей миллиметра до 5 см.

Состав элементов-примесей в берилле грейзенов и пегматитов приведен в таблице.

В обоих типах берилла наблюдаются высокие соотношения  $(La/Yb)_N$ , варьирующие от 5,5 до 12,9, свидетельствующие о сильно дифференцированном типе распределения легких и тяжелых РЗЭ. Это, как правило, обусловлено флюидным режимом при кристаллизации минерала.

Берилл пегматитового проявления Ручей Белый Камень зеленого цвета, близкого к изумруду (рис. 1), характеризуется повышенными концентрациями ванадия, галлия, скандия и хрома. Последний, а также наличие ионов  $Fe^{3+}$  в минерале, вероятно, и обуславливал зеленую окраску минерала [13]. В нем проявлены: тетрадный эффект фракционирования РЗЭ W-типа (значения  $TE_{1,3}$  ниже 0,9), а также более высокими отношениями Th/U, чем в грейзеновом берилле.

Берилл из грейзенов светлого зеленовато-голубоватого цвета имеет значительно более низкие содержания хрома и повышенные концентрации цезия, ниобия, тантала, рубидия, урана.



Рис. 1. Кристалл изумруда в пегматите

В нем проявлен ТЭФ РЗЭ W- и M-типов и только негативная аномалия по европию. Проявление обоих типов РЗЭ свидетельствует о меняющихся и комплексных составах флюидов, в которых активными были  $H_2O$ ,  $CO_2$ , HF и др.

Изоморфная емкость кристаллической структуры берилла впечатляет обилием элементов-примесей, входящих в его структуру, обусловленную сочетанием элементов тетраэдров, октаэдров и полых каналов. Общий облик микроструктуры берилла показан на рис. 2.

Элементы-примеси в берилле пегматитовых и грейзеновых проявлений  
Белокурихинского плутона (г/т)

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V	13,1	14,1	12,8	19,6	18,5	8,2	8,4	9,3	9,4	9,1
Cr	17,15	17,5	17,24	16,8	16,0	6,4	6,07	5,72	5,1	5,6
Co	1,4	1,3	0,9	0,8	0,5	0,6	0,5	0,4	0,4	0,5
Ni	2,8	3,0	3,0	2,0	3,0	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7
Cu	7,5	8,8	3,3	4,1	3,7	3,3	3,88	4,1	3,8	4,0
Zn	49,3	50,2	36,1	49,7	40,8	41,6	41,8	35	36	35,9
Rb	33,2	35,3	31,8	25,8	25,7	125,6	126,2	139,4	140,5	141,7
Sr	8,25	9,28	4,37	3,7	3,1	3,2	3,25	5,47	5,6	6,0
Nb	3,27	4,1	1,83	1,91	1,1	13,9	13,19	12,37	14,4	14,5
Cs	561	580	891	566	420	1396	1250	1260	1300	1325
Ba	35,2	36,1	30,1	28,3	24,9	24,1	25,6	12,1	12,4	12,2
Pb	11,4	12,1	4,44	8,7	8,1	8,0	8,81	10,5	11,4	11,5
Th	0,89	0,95	0,44	0,42	0,35	0,4	0,39	0,3	0,4	0,45
La	2,07	2,95	0,99	0,92	0,83	0,95	0,84	0,91	1,02	1,2
Ce	3,2	3,5	1,91	1,83	1,41	1,78	1,49	1,74	1,8	2,0
Pr	0,39	0,42	0,2	0,18	0,13	0,15	0,15	0,2	0,25	0,3
Nd	1,21	1,3	0,63	0,75	0,55	0,8	0,59	0,46	0,5	0,55
Sm	0,22	0,28	0,18	0,13	0,08	0,14	0,096	0,11	0,13	0,2
Eu	0,044	0,05	0,034	0,036	0,0091	0,035	0,0093	0,02	0,018	0,015
Gd	0,14	0,17	0,07	0,088	0,06	0,09	0,099	0,097	0,13	0,15
Tb	0,019	0,02	0,021	0,0097	0,021	0,01	0,022	0,017	0,02	0,03
Dy	0,19	0,22	0,03	0,04	0,033	0,08	0,035	0,076	0,08	0,09
Ho	0,04	0,05	0,011	0,0097	0,01	0,012	0,012	0,018	0,02	0,03
Er	0,12	0,15	0,052	0,026	0,015	0,027	0,019	0,063	0,07	0,09
Tm	0,024	0,03	0,015	0,011	0,005	0,013	0,0052	0,0091	0,01	0,014
Yb	0,15	0,16	0,099	0,041	0,055	0,05	0,061	0,074	0,12	0,15
Lu	0,031	0,04	0,013	0,0086	0,0093	0,09	0,0096	0,017	0,02	0,025
Y	1,38	1,45	0,66	0,44	0,45	0,5	0,48	0,94	1,2	1,4
Ga	19,3	20,1	18,8	17,5	14,8	14,9	15,6	11,3	11,8	12,1
Zr	6,62	8,12	4,45	4,13	2,9	3,0	3,24	12,4	12,5	12,7
Sc	12,86	14,7	15,48	22,73	21,18	1,2	1,22	1,55	1,6	1,48
Hf	0,26	0,25	0,28	0,09	0,1	0,11	0,1	0,11	0,12	0,12
Ta	0,76	0,8	0,25	0,22	0,1	2,23	2,1	3,5	2,6	2,55
Mo	14,6	14,5	13,36	15,07	12,2	24,6	22,39	23,8	24,2	25,5
Sb	0,51	0,55	0,45	0,29	0,25	0,3	0,26	0,51	0,45	0,5
Sn	0,97	1,0	0,87	0,56	0,85	0,6	0,86	0,9	0,98	1,1
W	15,8	16,1	17,74	15,87	15,1	5,5	5,17	19,2	20,5	21,5
U	0,95	1,01	0,73	0,46	0,15	9,5	12,2	13,5	14,0	13,8
Li	645	650	884	711	225	1230	1233	1120	1218	1265
Ge	0,23	0,25	0,15	0,19	0,1	0,95	0,9	0,58	0,6	0,7
Ag	0,044	0,045	0,042	0,022	0,15	0,03	0,12	0,13	0,15	0,16
Bi	3,85	3,77	7,28	5,57	8,5	5,2	7,06	7,8	8,1	8,2
ΣREE	9,23	10,79	4,92	4,52	3,67	4,73	3,92	4,75	5,39	6,24
(La/Yb) <sub>N</sub>	9,35	12,5	6,85	15,5	10,3	12,9	9,3	8,4	5,8	5,5
Eu/Eu*	1,04	0,65	0,76	0,97	0,38	0,89	0,28	0,58	0,42	0,25
Th/U	0,94	0,94	0,6	0,91	2,3	0,04	0,03	0,02	0,07	0,03
TE <sub>1,3</sub>	0,94	0,82	1,04	0,84	1,03	0,88	0,91	1,11	1,09	1,09

Примечание: анализы выполнены методами ICP-MS и ICP-AES в Лаборатории ИМГРЭ (г. Москва). Содержания элементов нормализованы по хондриту. TE<sub>1,3</sub> – тетрадный эффект фракционирования РЗЭ как среднее между первой и третьей тетрадами по [12]. Eu\* = (Sm<sub>N</sub> + Gd<sub>N</sub>)/2. 1–5 – пегматиты проявления Ручей Белый Камень; 6–10 – грейзены Курановского месторождения.

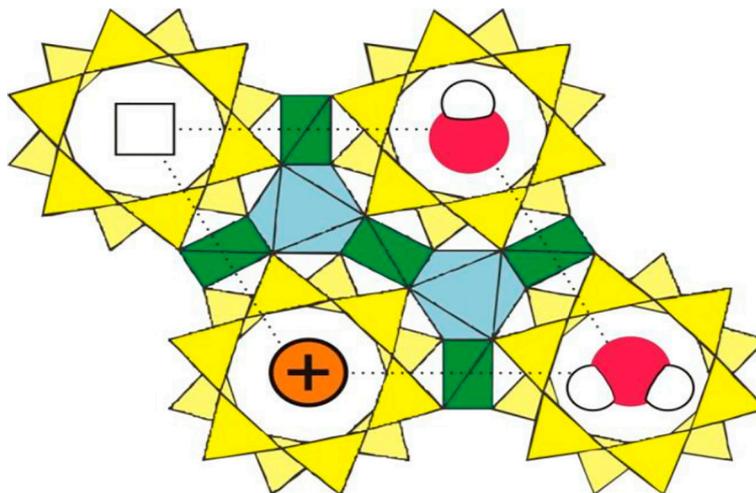


Рис. 2. Циклосиликатная структура берилла по [10]

Цветовые разновидности берилла, приуроченные к разным геолого-промышленным типам оруденения, характеризуются специфическими наборами элементов-примесей. Зеленые разновидности пегматитов предпочтительно накапливали Cr, Sc, V, Ga. При этом, скорее всего, это накопление происходило по принципу прямого изоморфного замещения в решетке берилла  $Al^{3+}$  трехвалентными катионами  $Sc^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $V^{3+}$  в октаэдрической позиции. Проявление ТЭФ РЗЭ W-типа в этом берилле объясняется повышенной активностью водных флюидов.

Зеленым показаны тетраэдры  $BeO_4$ ; голубым цветом выделены октаэдры  $AlO_6$ ; желтым – круги  $SiO_4$  (тетраэдры), которые образуют полые каналы; щелочные элементы – оранжевые; молекулы воды – красные.

С другой стороны, более высокие концентрации в берилле грейзенового типа в повышенных концентрациях таких элементов, как Li, Cs, Rb, вероятно, можно объяснить иным типом изоморфизма, когда замещение  $Al^{3+}$  двухвалентным Fe происходило с компенсацией заряда, обеспечиваемой входением одновалентных крупноионных литофильных элементов (Na, Cs, Li, K, Rb) в структурные позиции берилла. В этом случае проявлены ТЭФ РЗЭ W- и M-типа, когда активными были и водные флюиды и фтор-комплексы. Кроме того, в общей вертикальной зональности распространения грейзеновое оруденение располагается выше пегматитового и литофильные элементы предпочтительно концентрируются в грейзеновом берилле.

Таким образом, геохимические различия бериллов пегматитового и грейзенового типов можно объяснить различными пара-

метрами флюидного режима и особенностями проявления процессов изоморфизма.

Проблема кислотности-основности магматически-гидротермальных процессов является фундаментальной проблемой петрологии и эндогенного рудообразования. Нами определены характеристики кислотности и основности берилла из пегматитов и грейзенов путем расчета условного потенциала ионизации по методике [14]. Кислотно-основные свойства минералов определяются, как известно, их способностью к ионизации. В связи с более высокими концентрациями в изумруде пегматитов и потенциалов ионизации (ккал/г-атом) таких элементов, как Cr (417), V (404), Ga (439), Sc (351), интегральный условный потенциал ионизации составил 203,9, а для берилла грейзеновых месторождений с преобладанием таких элементов, как Li (124), Cs (89), Rb (96), Na (118), K(100) – 201, 6. Такие оценки условного потенциала ионизации явно указывают на то, что изумруду пегматитов свойственна более кислотная среда, а бериллу грейзенов – более основная.

### Заключение

Общей особенностью кристаллизации берилла пегматитов и грейзенов являлось высокое фракционирование тяжелых и легких лантаноидов, а также высокая активность летучих компонентов. Различия геохимических аспектов бериллов пегматитового и грейзенового типов Белокурихинского плутона определяются отличающимся флюидным режимом сравниваемых процессов, что предопределяло особенности изоморфного замещения  $Al^{3+}$  в позиционных структурах берилла. Зеленая окраска берилла, близкая к изумрудной,

определялась присутствием повышенных содержаний хрома и ионов  $Fe^{3+}$  в кристаллической структуре минерала, а его кристаллизация осуществлялась в условиях повышенной кислотности среды и значительной активности аквакомплексов в пегматитовых флюидах. Кристаллизация берилла грейзенов происходила в условиях основной среды минералообразования при значительной активности фтор- и аква-комплексов в пневматолито-гидротермальном процессе. Полученные результаты могут быть использованы при поисковых работах ювелирных разновидностей берилла, а также при создании прогнозно-поисковых комплексов бериллиевого оруденения в других регионах Горного и Рудного Алтая.

### Список литературы

1. Duan Z., Jiang Sh.-Y., Su H.-M., Salvi S., Monnier L., Zhu X., Lv X. Beryl as an indicator for elemental behavior during magmatic evolution and metasomatism in the large Shihuiyao Rb-Nb-Ta-Be deposit, Inner Mongolia, NE China // *Ore geology Reviews*. 2024. Vol. 166. 105940. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2024.105940.
2. Sardi F., Heimann A., Grosse P. Non-pegmatitic beryl related to Carboniferous granitic magmatism, Velasco Range, Pampean Province, NW Argentina // *Andean Geology*. 2016. Vol. 43, Is. 1. P. 86–104.
3. Jiang S.Y., Wang W., Su H.M. 2023. Super-enrichment mechanisms of strategic critical metal deposits: current understanding and future perspectives // *J. Earth Sci.* 2023. Vol 34, Is.1. P. 1295–1298. DOI: 10.1007/s12583-023-2001-5.
4. Wang Ch.-L., Jiang Sh. Y., Lei X.F. Mechanism of beryllium mineralization in a granite-pegmatite system: Constraints from ore geology and beryl mineralogy of the large Arskartor Be-Nb-Mo deposit, southern Chinese Altai // *Ore geology Reviews*. 2024. Vol. 167. 105996. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2024.105996.
5. Sardi F., Heimann A. Pegmatitic beryl as indicator of melt evolution: example from the Velasco district, Pampeana Pegmatite Province, Argentina, and review of worldwide occurrences // *The Canadian Mineralogist*. 2014. Vol. 52, Is. 5. P. 809–836.
6. Daneshvar N., Azizi H., Asahara Y., Tsuboi M., Minami M., Mohammad Y. Geochemistry and Genesis of Beryl Crystals in the LCT Pegmatite Type, Ebrahim-Attar Mountain, Western Iran // *Minerals* 2021. Vol. 11. P. 717. DOI: 10.3390/MIN11070717.
7. Černý P. Mineralogy of beryllium in Granitic Pegmatites. In *Beryllium: mineralogy, petrology and geochemistry* (Grew, E.; editor) // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2002. Vol. 50. P. 405–444.
8. Lum J.E., Viljoen F., Cairncross B., Frei D. Mineralogical and geochemical characteristics of beryl (aquamarine) from the Erongo Volcanic complex, Namibia // *J. Afr. Earth Sc.* 2016. Vol. 124. P. 104–125.
9. Khaleal F.M., Saleh G.M., Lasheen E.S.R., Lentz D.R. Occurrences and genesis of emerald and other beryls mineralization in Egypt: a review // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c/* 2022. Vol. 128. № 103266.
10. Hewton M.L. Investigation of the Mountain River Beryl (Emerald Variety) Occurrence, Mackenzie Mountains, Northwest Territories. Canada, 2012. 138 p.
11. Pauly C., Gysi A.P., Pfaff K., Merkel I. 2021. Beryl as indicator of metasomatic processes in the California Blue Mine topaz-beryl pegmatite and associated miarolitic pockets // *Lithos*. 2021. Vol. 404–405. № 106485.
12. Гусев А.И. Высокофракционированные гранитоиды Пишишского редкометалльного рудного поля Северного Кавказа // *Геология и геофизика Юга России*. 2023. Т. 13. № 1. С. 96–111. DOI: 10.46698/VNC.2023.80.89.007.
13. Andersson A.O. Comments on Beryl Colors and on Other Observations Regarding Iron-containing Beryls // *The Canadian Mineralogist*, 2019. Vol. 57, Is. 4. P. 551–566.
14. Жариков В.А. Кислотно-основные характеристики минералов // *Геология рудных месторождений*. 1967. № 5. С. 75–89.

## СТАТЬЯ

УДК 616.7-001-053.5

**ОСОБЕННОСТИ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ НЕСОВЕРШЕННОЛЕТНИХ  
СЕВЕРО-КАВКАЗСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА  
ОТ ТРАВМ И ВНЕШНИХ ПРИЧИН****Кокушин Д.Н.***ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии  
и ортопедии имени Г.И. Турнера, Пушкин, e-mail: partgerm@yandex.ru*

**Аннотация.** Травмы, отравления и некоторые другие последствия воздействия внешних причин имеют высокую значимость в структуре заболеваемости и смертности несовершеннолетних, опосредуя наступление временной и стойкой нетрудоспособности в перспективе и снижение качества жизни. На фоне демографического кризиса в России борьба с факторами риска данной патологии приобретает первоочередное значение. Анализ распространенности травматизма и его динамики представляет научно-практический интерес. Цель исследования – оценить особенности болезненности детей 0–14 и 15–17 лет от травм, отравлений и некоторых других последствий воздействия внешних причин на Северном Кавказе. Выполнен анализ случаев диагностики травм, отравлений и других последствий воздействия внешних причин при обращаемости несовершеннолетних в амбулаторное звено по данным ежегодных отчетов ЦНИИОЗ за 2018–2022 гг. по Северному Кавказу. Уровень заболеваемости детей 0–14 и 15–17 лет в Северо-Кавказском федеральном округе в 2022 г. составил 64,52 и 102,59 на 1000 детского населения и отставал в 1,5–1,6 раза от среднероссийских значений, а за 5 лет показал убывающий тренд динамики. Лидерами по частоте травматизма являлись Дагестан, Ставропольский край и Кабардино-Балкария. Самый низкий уровень сохранялся в Чеченской Республике. На начало коронавирусной пандемии на Северном Кавказе наблюдалось снижение обращаемости за медицинской помощью. Однако в Дагестане и Северной Осетии прирост случаев травматизма продолжился. Отмечен низкий уровень и нисходящий тренд динамики заболеваемости детей от травм и других внешних причин. Наибольшая частота травматизма регистрировалась в Дагестане, Ставропольском крае и Кабардино-Балкарии. На протяжении пандемии вируса SARS-CoV-2 в большинстве регионов СКФО был спад обращаемости, кроме Дагестана и Северной Осетии. Выявленные особенности, возможно, связаны со спецификой организации досуга детей, дефицитом медицинских ресурсов и низкой медицинской активностью населения.

**Ключевые слова:** распространенность травматизма, болезни костно-мышечной системы, здоровье детей, южные регионы России, Северо-Кавказский федеральный округ, здоровье подростков

**FEATURES OF INCIDENCE IN MINORS IN THE NORTH CAUCASUS  
FEDERAL DISTRICT FROM INJURIES AND EXTERNAL CAUSES****Kokushin D.N.***G.I. Turner National Medical Research Center for Pediatric Traumatology and Orthopedics,  
Pushkin, e-mail: partgerm@yandex.ru*

**Annotation.** Injuries, poisonings and some other consequences of external causes are of high importance in the structure of morbidity and mortality among minors, mediating the onset of temporary and permanent disability in the future and a decrease in the quality of life. Against the backdrop of the demographic crisis in Russia, the fight against risk factors for this pathology is of primary importance. Analysis of the prevalence of injuries and its dynamics is of scientific and practical interest. Purpose: to assess the characteristics of morbidity in children aged 0–14 and 15–17 years from injuries, poisoning and some other consequences of external causes in the North Caucasus Federal District. An analysis of cases of diagnosis of injuries, poisonings and other consequences of external causes when minors were referred to outpatient care was carried out according to the annual reports of the Central Research Institute of Health for 2018–2022 in the North Caucasus. The incidence rate of children 0–14 and 15–17 years old in the North Caucasus Federal District in 2022 was 64.52 and 102.59 per 1000 child population and lagged 1.5–1.6 times behind the Russian average, and in 5 years showed a decreasing trend in dynamics. The leaders in the frequency of injuries were Dagestan, Stavropol Territory and Kabardino-Balkaria. The lowest level remained in the Chechen Republic. At the beginning of the coronavirus pandemic in the North Caucasus, there was a decrease in the number of people seeking medical help. However, in Dagestan and North Ossetia, the increase in injury cases continued. A low level and downward trend in the dynamics of morbidity among children from injuries and other external causes were noted. The highest frequency of injuries was recorded in Dagestan, Stavropol Territory and Kabardino-Balkaria. During the SARS-CoV-2 virus pandemic, in most regions of the North Caucasus there was a decline in the number of patients, except for Dagestan and North Ossetia. The identified features may be related to the specifics of organizing children's leisure time, the shortage of medical resources and the low medical activity of the population.

**Keywords:** prevalence of injuries, diseases of the musculoskeletal system, children's health, southern regions of Russia, North Caucasus Federal District, adolescent health

Травмы и последствия внешних воздействий являются социально значимой проблемой в охране здоровья ребенка [1, 2]. Развитие данной патологии на фоне растущего орга-

низма несет различные риски, опосредуя развитие хронических состояний и осложнений, наступление временной и стойкой нетрудоспособности, снижение качества жизни [3–5].

Болезни костно-мышечной системы сохраняют превосходство среди большинства причин инвалидности. При первичном освидетельствовании ребенка в медико-социальных бюро данная патология занимает пятое место в структуре причин, а при повторном – даже четвертое [6].

Статистические показатели обращаемости детского населения в поликлинику дают возможность изучить уровень и вариабельность колебаний частоты случаев для оценки доступности медицинских ресурсов, качества учета и стратегического планирования профильных медицинских услуг [7, 8]. Вместе с тем региональные особенности распространенности патологии делают оценку более дифференцированной, а выводы наиболее точными [9–11].

Южные регионы России имеют ряд особенностей, напрямую влияющих на процесс оказания медицинской помощи (территориальный ландшафт и маршрутизация пациентов, кадровый дефицит и медицинская активность населения) [12, 13]. Наряду с этим анализ обращаемости детей с травмами и отравлениями за последние 5 лет представляется актуальным и диктует необходимость подробного анализа.

Цель исследования – оценить особенности болезненности детей 0–14 и 15–17 лет от травм, отравлений и некоторых других последствий воздействия внешних причин на Северном Кавказе.

#### Материалы и методы исследования

В работе изучен материал официальных статистических сборников центрального научно-исследовательского института организации и информатизации здравоохранения» Минздрава России «Общая заболеваемость детского населения России» 0–14 лет и 15–17 лет отдельно по Российской Федерации (РФ), Северо-Кавказскому федеральному округу (СКФО) и его регионам [14–16]. Показатели болезненности травм, отравлений и некоторых других последствий воздействия внешних причин отражены в расчете на 1000 детского населения соответствующего возраста (‰). Специфика болезненности изучена посредством оценки уровня и динамики частоты обращаемости несовершеннолетних в медицинские организации. Для анализа относительных величин применялся непараметрический метод ранговой корреляции Спирмена с пограничной степенью значимости равной 0,05. Статистическая обработка, анализ и визуализация полученных результатов проводилась в MS Office-2016 (Word, Excel).

**Результаты исследования и их обсуждение**

Частота случаев травм, отравлений и других воздействий внешних причин у детей 0–14 лет в СКФО имела низкий уровень. На 2022 г. показатель составил 64,52‰ (на 1000 детского населения) и отстал от средних данных по РФ в 1,6 раз (103,93‰) (рис. 1).

Все 5 лет разница между показателями имела устойчивый характер. Динамика частоты зарегистрированных случаев как по РФ, так и по СКФО за 5-летний период имела волнообразный характер с небольшой убывающей тенденцией. В целом темп снижения заболеваемости составил по РФ – 2,4%, по СКФО – 6,1%.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Частота случаев травм, отравлений и других воздействий внешних причин у детей 0–14 лет в СКФО имела низкий уровень. На 2022 г. показатель составил 64,52‰ (на 1000 детского населения) и отстал от средних данных по РФ в 1,6 раз (103,93‰) (рис. 1).

Все 5 лет разница между показателями имела устойчивый характер. Динамика частоты зарегистрированных случаев как по РФ, так и по СКФО за 5-летний период имела волнообразный характер с небольшой убывающей тенденцией. В целом темп снижения заболеваемости составил по РФ – 2,4%, по СКФО – 6,1%.

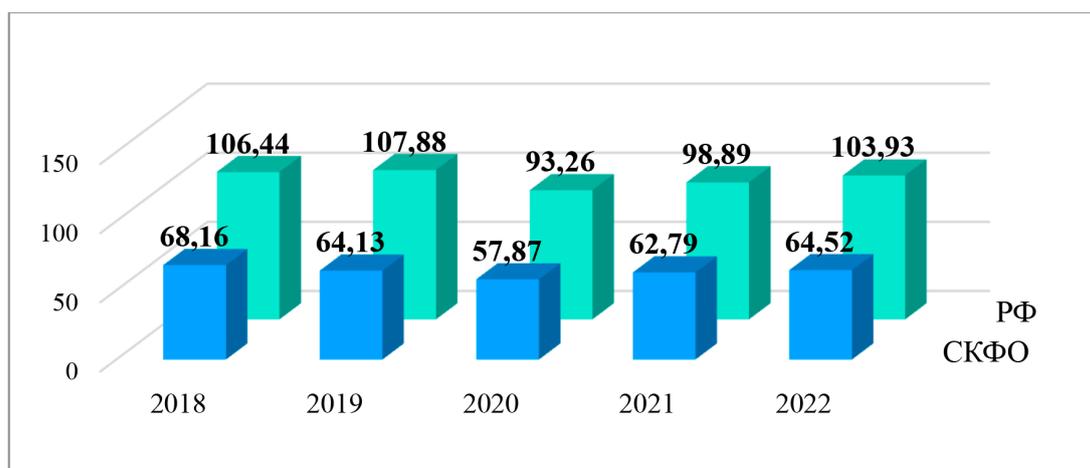


Рис. 1. Динамика заболеваемости детей 0–14 лет от травм, отравлений и некоторых других последствий воздействия внешних причин в Российской Федерации и Северо-Кавказском федеральном округе за 2018–2022 гг. (на 1000 детей соответствующего возраста)

Таблица 1

Динамика заболеваемости от травм, отравлений и некоторых других последствий воздействия внешних причин среди детей 0–14 лет в регионах Северо-Кавказского федерального округа за 2018–2022 гг. (на 1 000 детского населения)

Регионы СКФО	2018	2019	2020	2021	2022	Ранжирование по частоте заболеваемости (на 2022 г.)	Темп убыли\ прироста, %
Дагестан	107,66	94,7	77,67	86,44	88,94	1	-17,4
Ингушетия	53,65	47,99	52,27	46,23	43,51	5	-18,9
Кабардино-Балкарская Республика	51,72	48,74	52,2	44,17	60,66	3	14,7
Карачаево-Черкесская Республика	47,63	60,55	55,02	49,79	53,38	4	10,8
Республика Северная Осетия – Алания	48,97	28,91	30,4	38,13	42,19	6	-13,8
Чеченская республика	9,27	11,19	13,09	19,89	24,72	7	62,5
Ставропольский край	82,57	88,04	81,85	87,33	79,09	2	-4,2

На фоне пандемии коронавирусной инфекции в 2020 г. прослеживался спад обращаемости несовершеннолетних с травмами, отравлениями и некоторыми другими последствиями воздействия внешних причин. По сравнению с 2019 г. в 2020 г. темп убыли показателя составил 13,6% по РФ и 9,8% по СКФО. В то же время в последующий период произошло быстрое нарастание показателя с тенденцией к восстановлению первоначальных значений заболеваемости. Так, за период с 2021 по 2022 г. частота патологии по РФ и в рассматриваемом федеральном округе выросла на 4,8 и 2,7% соответственно.

Среди субъектов РФ в составе СКФО частота заболеваемости несовершеннолетних 0–14 лет имела следующие особенности. По частоте случаев травм, отравлений и некоторых других последствий воздействия внешних причин весь период наблюдения лидировал Дагестан (на 2022 г. показатель заболеваемости достиг уровня 88,94‰), на втором месте – Ставропольский край (79,09‰), третьем – Кабардино-Балкария (60,66‰), четвертом – Карачаево-Черкесия (53,38‰), пятом – Ингушетия (43,51‰), шестом и седьмом – Северная Осетия и Чеченская республика (42,19 и 24,72‰) (табл. 1).

За 2018–2022 гг. четыре региона продемонстрировали положительную картину с уменьшением случаев заболеваемости: Ингушетия на 18,9%, Дагестан на 17,4%, Северная Осетия на 13,8% и Ставропольский край на 4,2%. В остальных субъектах наблюдался рост: в Чеченской Республике на 62,5%, Кабардино-Балкарии – на 14,7% и Карачаево-Черкесии – на 10,8%. Что примечательно, в Чеченской Республике все 6 лет показатель заболеваемости был самым

низким, однако ежегодный сильный прирост детских обращений свидетельствует о крайне неблагоприятной ситуации в регионе.

В 2020 г. на фоне начала пандемии в регионах наблюдалась вариативность. По сравнению с 2019 г. в Дагестане, Карачаево-Черкесии и Ставропольском крае регистрировался спад обращаемости детей с травмами, отравлениями и другими последствиями внешних причин на 18,0; 9,1 и 7,0% соответственно. В то же время в Ингушетии, Кабардино-Балкарии, Северной Осетии и Чеченской Республике в этот период был отмечен прирост заболеваемости: на 8,2; 6,6; 4,9 и 14,5%.

У подростков складывалась похожая картина. Уровень заболеваемости в СКФО в 2022 г. был ниже, чем по РФ, в 1,5 раз – 102,59‰ против 153,62‰. Причем соотношение частоты обращений по данному профилю сохранялось все 5 лет наблюдений (1,3–1,5 раз) (рис. 2).

Кроме того, частота травматизма у подростков в 1,6–2 раза превышала значение показателя заболеваемости у детей 0–14 лет ( $p \leq 0,05$ ).

Изменение частоты травматизма на протяжении 2018–2022 гг. носило убывающий характер, темп снижения составил в среднем по РФ – 11,9% и в СКФО – 18,2%. Необходимо отметить, что если по СКФО за 5 лет снижение было устойчивым, то по РФ в 2020 г. отмечалось сокращение уровня показателя с последующим ростом. Так, на начало пандемии спад в уровне диагностики случаев подростковых травм и других последствий внешних причин в целом по РФ составил 21,6% (по сравнению с 2019 г.) с последующим увеличением на 4,2% в 2021–2022 гг.

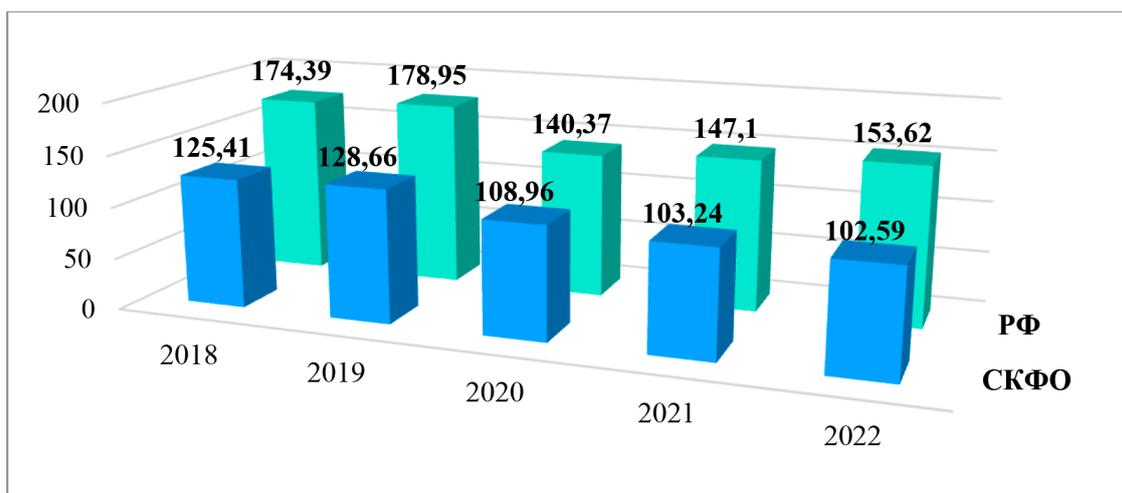


Рис. 2. Динамика заболеваемости подростков 15–17 лет от травм, отравлений и других последствий воздействия внешних причин в Российской Федерации и в Северо-Кавказском федеральном округе за 2018–2022 гг. (на 1000 детей соответствующего возраста)

Таблица 2

Динамика заболеваемости от травм, отравлений и некоторых других последствий воздействия внешних причин среди подростков 15–17 лет в регионах Северо-Кавказского федерального округа за 2018–2022 гг. (на 1 000 детского населения)

Регионы СКФО	2018	2019	2020	2021	2022	Ранжирование по частоте заболеваемости (на 2022 г.)	Темп убыли / прироста, %
Дагестан	156,84	127,54	117,14	133,3	146,86	1	-6,3
Ингушетия	72,86	65,64	69,06	57,26	51,2	6	-29,7
Кабардино-Балкарская Республика	222,7	260,34	240,29	148,97	118,46	3	-46,8
Карачаево-Черкесская Республика	79,91	116,94	64,59	95,1	84,88	4	5,9
Республика Северная Осетия – Алания	122,18	105,36	82,5	66,15	83,67	5	-31,5
Чеченская Республика	24,8	38,14	36,01	34,91	31,1	7	20,3
Ставропольский край	156,13	193,89	146,92	129,85	119,61	2	-23,4

В субъектах СКФО картина заболеваемости подростков была следующей. Превосходство по частоте демонстрировали Дагестан (в 2022 г. частота обращений по рассматриваемым нозологическим формам достигала 146,86‰), Ставропольский край (119,61‰) и Кабардино-Балкария (118,46‰). Остальные регионы имели более низкие показатели: Карачаево-Черкессия – 84,88‰, Северная Осетия – 83,67‰, Ингушетия – 51,2‰ и Чеченская республика – 31,1‰ (табл. 2).

Обращает на себя внимание, что Кабардино-Балкария на протяжении 4 лет, с 2018 по 2021 г., сохраняла первенство по обра-

емости подростков с травмами и отравлениями. Однако в 2022 г. утратила лидирующие позиции и заняла 3 место.

Колебание показателей за 5 лет в большинстве регионов СКФО носило положительный характер: темп убыли в Кабардино-Балкарии был 46,8%, Северной Осетии 31,5%, Ингушетии 29,7%, Ставропольском крае 23,4% и Дагестане 6,3%. Вместе с тем в Чеченской республике и Карачаево-Черкессии частота случаев, наоборот, возросла на 20,3 и 5,9% соответственно.

Необходимо отметить, что в Кабардино-Балкарии, Чеченской Республике и Ставропольском крае наблюдалась схожая вари-

бельность динамики с максимальным подъемом числа обращений в 2019 г. (на 14,5; 35,0 и 19,5% соответственно). В дальнейший период с 2020 по 2022 г. регистрировалось ежегодное уменьшение заболеваемости, в первом и последнем случае ниже первоначальных значений.

Также на фоне пандемии COVID-19 с 2020 по 2022 г. был отмечен стойкий прирост заболеваемости в Дагестане (на 20,2%) и Карачаево-Черкесии (23,9%).

### Заключение

В период с 2018 по 2022 г. болезненность детей 0–14 лет и подростков 15–17 лет от травм, отравлений и некоторых других последствий воздействия внешних причин на Северном Кавказе находилась на низком уровне и имела убывающий характер. В то же время частота патологии у подростков в 1,6–2,0 раза превышала частоту заболеваемости у детей 0–14 лет. Лидерами по травматизму у детей являлись Дагестан, Ставропольский край и Кабардино-Балкарская Республика. Напротив, в Чеченской Республике показатель был самым низким весь период наблюдения. Положительная динамика и снижение частоты рассматриваемых нозологических форм у детей 0–14 лет отмечались в Ингушетии, Дагестане, Северной Осетии и Ставропольском крае, а у подростков – в Кабардино-Балкарии, Северной Осетии и Ингушетии. На фоне начала пандемии SARS-CoV-2 в большинстве регионов регистрировался спад обращаемости детей за медицинской помощью, однако последующий период в большинстве случаев показал коррекцию и восстановление ранее начатого тренда. Выявленные особенности в распространенности патологии между регионами СКФО, возможно, связаны со спецификой организации досуга несовершеннолетних, охватом профилактическими мероприятиями и дефицитом медицинских ресурсов.

### Список литературы

1. Валина С.Л., Штина И.Е., Маклакова О.А., Устинова О.Ю., Эйфельд Д.А. Закономерности развития у школьников болезней костно-мышечной системы в условиях комплексного воздействия факторов среды обитания и образа жизни // *Анализ риска здоровью*. 2021. № 3. С. 54–66.
2. Крукович Е.В., Догадина Н.А., Каблуков Д.А., Плехова Н.Г. Причины формирования и факторы риска патоло-

гии костно-мышечной системы у детей и подростков // *Современные проблемы науки и образования*. 2017. № 5. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=26891> (дата обращения: 15.02.2024).

3. Кириленко В.В. Жизнь человека как фактор социально-экономического развития в здравоохранении // *FORCIPE*. 2023. Т. 6, № S1. С. 288–289.

4. Кокушин Д.Н., Соколова В.В., Кириленко В.В. Изучение потребностей детей с неврологической патологией в мерах социальной поддержки // *Современные проблемы науки и образования*. 2022. № 3. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=31804> (дата обращения: 02.02.2024).

5. Кокушин Д.Н., Хардииков М.А., Виссарионов С.В., Соколова В.В., Хусайнов Н.О., Залетина А.В. Сравнительный анализ качества жизни детей с врожденным сколиозом после хирургического лечения: экстирпация полупозвонка из дорсального и комбинированного доступов // *Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста*. 2021. Т. 9, № 2. С. 153–162.

6. Баиндурашвили А.Г., Виссарионов С.В., Залетина А.В., Лапкин Ю.А., Щепина Е.Н. Показатели травматизма у детей Санкт-Петербурга и оказание стационарной травматологической помощи // *Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста*. 2023. Т. 11, № 2. С. 173–183. DOI: 10.17816/PTORS159389.

7. Ганузин В.М., Маскова Г.С., Сторожева И.В., Сухова Н.С. Анализ динамики состояния здоровья детей и подростков по результатам диспансерных осмотров // *Российский вестник гигиены*. 2021. № 3. С. 9–12. DOI: 10.24075/rbh.2021.019.

8. Гречухин И.В., Кульков В.Н., Фомичев В.В. Анализ заболеваемости детей вследствие травм, отравлений и болезней костно-мышечной системы по данным официальной статистики // *Медицина*. 2019. № 2. С. 24–39.

9. Соколовская Т.А., Армашевская О.В., Сачек О.И. Основные тенденции заболеваемости детей первого года жизни в Российской Федерации // *Российский вестник перинатологии и педиатрии*. 2021. № 66(6). С. 39–45. DOI: 10.21508/1027-4065-2021-66-6-39-45.

10. Капранов С.В. Распространенность травматизма у детей и подростков в населенных пунктах с различной экологической ситуацией // *Медицинский вестник Юга России*. 2014. № 3. С. 104–108.

11. Мусина А.А., Амирсеитова Ф.Т., Исмаилова А.А. Влияние пандемии COVID-19 на показатели травматизма в мире и в Казахстане // *Traumatology and Orthopaedics of Kazakhstan*. 2021. № 1. С. 48–52.

12. Юрьев В.К., Сулейманов Э.А., Межидов К.С., Моисеева К.Е. Особенности первичной заболеваемости детского населения Чеченской Республики // *Медицина и организация здравоохранения*. 2022. № 3. С. 20–27.

13. Котова Е.Г., Кобякова О.С., Стародубов В.И., Александрова Г.А., Голубев Н.А., Оськов Ю.И., Поликарпов А.В., Шелепова Е.А. Общая заболеваемость детского населения России (0–14 лет) в 2022 году. Статистические материалы. Часть VI. М.: ЦНИИОИЗ Минздрава России, 2023. 147 с.

14. Александрова Г.А., Голубев Н.А., Тюрина Е.М., Оськов Ю.И., Шелепова Е.А., Поликарпов А.В. Заболеваемость детского населения России (15–17 лет). Статистические материалы. Часть IX. М.: ЦНИИОИЗ Минздрава России, 2022. 148 с.

15. *Здравоохранение в России. 2022: Статистический сборник / Росстат*. М., 2023. 171 с.

## СТАТЬЯ

УДК 536.24

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ  
НЕДНОРОДНОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПЛОТНОСТИ  
В СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ БИНАРНОЙ СМЕСИ****Емельянов В.М., Леднев А.К.***Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,  
Москва, e-mail: icingsugar@mail.ru*

**Аннотация.** Представлена система уравнений динамики и теплопереноса в сверхкритической бинарной смеси, являющейся модификацией системы уравнений для описания динамики и теплопереноса в однокомпонентной сверхкритической среде. Исходная модель была дополнена двумя уравнениями диффузии компонентов, в качестве уравнения состояния использовалась сумма уравнений состояний компонентов (закон Дальтона) с соответствующей поправкой, учитывающей взаимодействие молекул разных компонент, а коэффициенты динамической вязкости и удельной теплоемкости смеси при постоянном объеме представлены в виде выражений через соответствующие коэффициенты компонент. Пример расчета пистон-эффекта в замкнутой области для однокомпонентной среды показал, что модифицированная и первоначальная модели дают сходные результаты. Проведены расчеты релаксации разрыва плотности и температуры в одно- и неоднородной по составу сверхкритической бинарной смеси при условии равенства начального давления по обе стороны от разрыва. Показано, что в случае неоднородной по составу смеси существует область начальных параметров, при которых режим релаксации характеризуется значительными локальными изменениями плотности слева и справа от начального разрыва. Интенсивность этих изменений зависит от степени приближения к термодинамической критической точке.

**Ключевые слова:** численный расчет, сверхкритическая бинарная смесь, разрыв температуры и плотности, релаксация, степень приближения к критической точке

*Работа выполнена в рамках задания по госбюджетной теме FFGN-2024-0005 № 124012500442-3.*

**NUMERICAL MODELLING OF RELAXATION  
OF TEMPERATURE AND DENSITY DISCONTINUITY  
IN A SUPERCRITICAL BINARY MIXTURE****Emelyanov V.M., Lednev A.K.***Institute for Problems in Mechanics Russian Academy of Sciences,  
Moscow, e-mail: icingsugar@mail.ru*

**Annotation.** Set of governing equations of dynamics and heat transfer in a supercritical binary mixture is presented. The set of equations is a modification of that of dynamics and heat transfer for a one-component supercritical fluid. The initial model is supplemented with two diffusion equations of the components, the sum of the equations of states of the components (Dalton's law) was used as the equation of state with an appropriate correction taking into account the interaction of molecules of different components, and the coefficients of dynamic viscosity and specific heat of the mixture at constant volume are presented as expressions through the corresponding coefficients of the components. An example of calculating the piston effect in a closed area for a one-component fluid showed that the modified and initial models give similar results. Numerical calculations of the decay of density and temperature discontinuity at the same initial pressure on both sides of the discontinuity are carried out for homogeneous and heterogeneous supercritical binary mixture. It is shown that for heterogeneous mixtures there is a parameter range in which the decay is characterized by significant local density perturbations to the left and right of the initial discontinuity. The intensity of the local density perturbations depends on the distance to the thermodynamic critical point.

**Keywords:** numerical calculations, supercritical binary mixture, density and temperature discontinuity, relaxation, distance to the critical point

*The work was carried out within the framework of the assignment on the state budget topic FFGN-2024-0005 No. 124012500442-3.*

К настоящему времени проведено большое число теоретических, экспериментальных и численных исследований особенностей тепло- и массопереноса в однокомпонентных сверхкритических флюидах вблизи критической точки. Выявлен ряд особенностей конвективного теплообмена, тепло- и массопереноса при нагревании

границ замкнутой области (так называемый «пистон-эффект») и релаксации возмущенных термодинамических параметров [1–3]. Характер обнаруженных особенностей существенным образом зависит от степени приближения к критической точке.

Можно ожидать, что в однородной по составу бинарной смеси должны про-

являться все особенности тепло- и массопереноса, характерные для однокомпонентных флюидов. В самом деле, составленная в определенной пропорции из двух компонентов смесь может рассматриваться как некоторый новый однокомпонентный флюид. Критические параметры, термодинамические свойства и свойства переноса такого флюида могут быть найдены по известным свойствам составляющих. Этому вопросу посвящено множество исследований [4, 5], в которых предложены адекватные уравнения состояния для описания смеси с любым соотношением компонентов для большинства имеющих практическое значение смесей. Релаксация температурно-плотностной неоднородности в этом случае может быть описана с помощью уравнений, справедливых для описания однокомпонентной среды, и использования уравнения состояния для смеси.

В случае неоднородных по составу смесей система уравнений должна быть дополнена уравнением диффузии, а давление в бинарной системе представляется как сумма давлений компонентов.

В данной работе приведена система уравнений для расчетов движения и теплопереноса в бинарных смесях и представлен численный расчет релаксации неоднородностей плотности и температуры в однородной и неоднородной по составу смеси углекислого газа и шестифтористой серы, находящейся вблизи критической точки. В качестве температурно-плотностной неоднородности рассмотрен начальный разрыв температуры и плотности.

Целью исследования является определение особенностей тепло- и массопереноса в сверхкритических бинарных смесях.

### Материалы и методы исследования

Исследование проводится методом численного решения системы уравнений для описания движения и теплопереноса в бинарной смеси.

Система одномерных безразмерных уравнений для описания движения и теплопереноса в бинарной смеси может быть записана в виде (прямым шрифтом изображаются безразмерные величины, а наклонным – размерные) [6]:

$$\rho \left[ \rho \left( \text{Sh} \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} \right] = \frac{4}{3} (C_R^a \rho_a + C_R^b \rho_b) \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2}, \quad (1)$$

$$\text{Sc}_a \rho \left( \text{Sh} \frac{\partial \rho_a}{\partial t} + V_x \frac{\partial \rho_a}{\partial x} + \rho_a \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) = C_R^a \left( \rho \frac{\partial^2 \rho_a}{\partial x^2} - \rho_a \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \right), \quad (2)$$

$$\text{Sc}_b \rho \left( \text{Sh} \frac{\partial \rho_b}{\partial t} + V_x \frac{\partial \rho_b}{\partial x} + \rho_b \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) = C_R^b \left( \rho \frac{\partial^2 \rho_b}{\partial x^2} - \rho_b \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \right), \quad (3)$$

$$\left( \frac{\rho_a}{\gamma_0^a - 1} + \frac{\rho_b}{\gamma_0^b - 1} \right) \left( \text{Sh} \frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + M_0^2 T \frac{\partial p}{\partial T} \frac{\partial V_x}{\partial x} = C_{\text{pe}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (4)$$

$$\rho = \rho_a + \rho_b. \quad (5)$$

$$p = \left[ \frac{R_a c}{1 - b_a c \rho} + \frac{R_b (1 - c)}{1 - b_b (1 - c) \rho} \right] \rho T - \left[ a_a c^2 + A_{ab} c (1 - c) + a_b (1 - c)^2 \right] \rho^2 \quad (6)$$

где  $\text{Sh} = \frac{L}{\tilde{V} \tilde{t}}$  – число Струхала для смеси,  $L$  – масштаб длины,  $\tilde{t}$  – масштаб времени,  $\tilde{V}$  – масштаб скорости;  $\tilde{p} = \tilde{\rho} \tilde{V}^2$  – масштаб давления,  $\tilde{\rho}$  – масштаб плотности,  $C_R^a = \frac{\mu_a}{\tilde{\rho} L \tilde{V}}$ ,

$C_R^b = \frac{\mu_b}{\tilde{\rho} L \tilde{V}}$ ,  $\text{Sc}_a = \frac{\mu_a}{\tilde{\rho} D}$  – число Шмидта для газа (a);  $\text{Sc}_b = \frac{\mu_b}{\tilde{\rho} D}$  – число Шмидта для газа (b);

$D$  – коэффициент диффузии,  $\gamma_0^a = \frac{R + C_v^a}{C_v^a}$ ,  $R$  – универсальная газовая постоянная;

$\gamma_0^b = \frac{R + C_v^b}{C_v^b}$ ;  $M_0 = \frac{\tilde{V}}{\sqrt{R \tilde{T}}}$ ,  $\tilde{T}$  – масштаб температуры;  $C_{\text{pe}} = \frac{\lambda}{R \tilde{\rho} \tilde{V} L}$ .

Здесь для  $t > 0$ , и  $0 < x < 1$  уравнение (1) является уравнением движения Навье – Стокса смеси газов (a) и (b) со скоростью  $V_x$ , уравнения (2), (3) представляют собой уравнения диффузии соответственно компонентов (a) и (b), уравнение (4) есть уравнение баланса энергии, соотношение (5) определяет плотность смеси как сумму плотностей компонентов (a) и (b) и уравнение (6) является уравнением состояния смеси (закон Дальтона).

В системе уравнений (1)–(6)  $\rho$  есть плотность смеси,  $p$  – давление смеси,  $D$  – коэффициент диффузии,  $T$  – температура смеси,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности. Отношение  $c = \rho_a / \rho$  является массовой концентрацией компонента (a), соответственно  $(1 - c) = \rho_b / \rho$  – массовая концентрация компонента (b).

При выводе системы уравнений предполагалось, что для динамической вязкости смеси  $\mu$  и удельной теплоемкости смеси при постоянном объеме  $C_V$  имеют место соотношения

$$\mu = \mu_a \frac{\rho_a}{\rho} + \mu_b \frac{\rho_b}{\rho}, \quad (9)$$

$$C_V = C_V^a \frac{\rho_a}{\rho} + C_V^b \frac{\rho_b}{\rho}, \quad (10)$$

где  $\mu_a$ ,  $\mu_b$  есть соответственно динамические вязкости компонентов (a) и (b),  $C_V^a$ ,  $C_V^b$  – соответственно удельные теплоемкости при постоянном объеме газов (a) и (b).

Уравнение состояния представляет собой сумму уравнений состояний компонен-

тов (закон Дальтона) с поправкой  $A_{ab}c(1 - c)$ , учитывающей взаимодействие молекул компонентов (a) и (b) между собой [7].

Для вычисления безразмерных комплексов, входящих в уравнения (1)–(6), использовались следующие константы:

$$(\text{CO}_2) T_c = 304,15 \text{ К}, \rho_c = 470 \text{ кг/м}^3,$$

$$R_a = 188,95 \text{ Дж/кг·град}, C_V^a = 740 \text{ Дж/кг·град},$$

$$\mu_a = 16 \cdot 10^{-6} \text{ Па·с}, \gamma_0^a = 1,2553;$$

$$(\text{SF}_6) T_c = 318,7 \text{ К}, \rho_c = 744 \text{ кг/м}^3,$$

$$R_b = 56,9 \text{ Дж/кг·град}, C_V^b = 1000 \text{ Дж/кг·град},$$

$$\mu_b = 40 \cdot 10^{-6} \text{ Па·с}, \gamma_0^b = 1,0569.$$

Значения коэффициента теплопроводности и коэффициента диффузии

$$\lambda = 1,2 \text{ Вт/м·град и } D = 5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}.$$

$$\text{Масштабы переменных } L = 10^{-2} \text{ м},$$

$$\tilde{p} = 470 \text{ кг/м}^3, \tilde{t} = 319 \text{ К}, \tilde{P} = 1,8 \text{ МПа},$$

$$\tilde{V} = 49,17 \text{ м/с}, \tilde{t} = L / \tilde{V} = 2,03 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

Представленная система одномерных безразмерных уравнений является модификацией системы уравнений для описания динамики и теплопереноса в однокомпонентной сверхкритической среде [8]. Вместо уравнения сохранения массы используются два уравнения диффузии компонентов, а уравнение состояния представлено в виде суммы уравнений состояний компонентов с поправкой, учитывающей взаимодействие молекул разных компонентов. Численная схема и методика расчетов сохранены в неизменном виде.

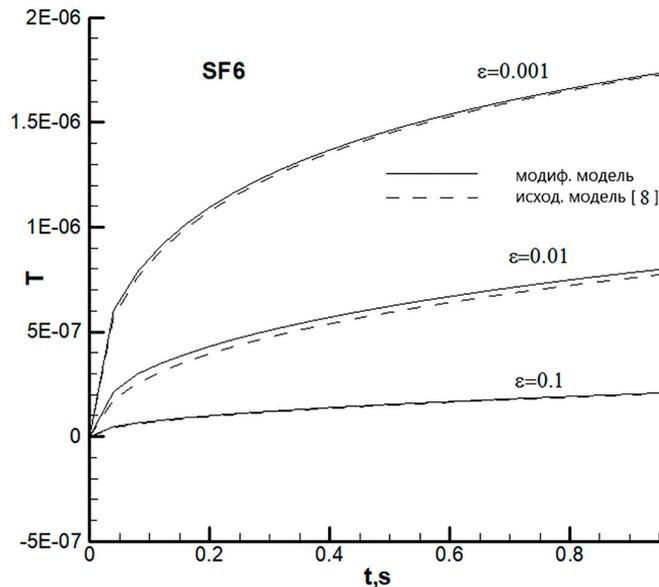


Рис. 1. Зависимость температуры в центре расчетной области от времени, рассчитанная по модифицированной (сплошная линия) и исходной [8] (пунктирная линия) модели

Исходная система уравнений использовалась в ряде работ авторов для расчетов пистон-эффекта и релаксации температурно-плотностных возмущений при нагревании границ замкнутого объема. Результаты расчетов показали хорошее согласие с экспериментом [8].

Для проверки правильности работы предлагаемой модификации модели было проведено сравнение расчетов с помощью модифицированной и исходной модели. Для сравнения был использован расчет нагрева замкнутой области, заполненной сверхкритической шестифтористой серой ( $SF_6$ ) в результате нагрева стенок [8]. На рис. 1 представлены графики зависимостей безразмерной температуры от времени в центре одномерной области при повышении температуры границ на 1 мК при различных значениях степени приближения к критической точке, характеризуемой величиной  $\epsilon = (T - T_{кр.}) / T_{кр.}$ , где  $T_{кр.}$  – критическая температура. На рисунке видно хорошее согласие между кривыми, полученными с помощью модифицированной (сплошные кривые) и исходной (пунктирные кривые) модели.

**Результаты исследования и их обсуждение**

Расчеты релаксации начального разрыва температуры и плотности в одномерной области проводились для смеси углекислого газа ( $CO_2$ ), компонент (а), и шестифтористой серы ( $SF_6$ ), компонент (б). Границы области считались адиабатическими, а для скорости и плотности задавались условия непротекания.

Предполагалось, что в начальный момент времени в точке  $x = 0,1$  ( $x$  – безразмерная координата) существует разрыв плотности и температуры. Слева от поверхности разрыва (область (1)) среда имеет плотность  $\rho_1$ , температуру  $T_1$ , и концентрацию компонента (а)  $c_1$ , а справа от поверхности разрыва (область (2)) плотность  $\rho_2$ , температуру  $T_2$  и концентрацию компонента (а)  $c_2$ . При этом значения плотности и температуры выбирались такими, что величина давления по обе стороны от разрыва одна и та же ( $p_1 = p_2$ ). Расчеты проведены для случаев, когда в областях (1) и (2) в начальный момент состав смеси одинаков и когда в областях (1) и (2) находятся смеси разной концентрации  $c$ .

На рис. 2 представлен пример расчета зависимости распределения температуры и плотности для первого случая, когда в начальный момент времени область (1) и область (2) заполнены чистым  $CO_2$ . В этом случае равенство давлений по обе стороны от поверхности разрыва можно обеспечить, только если  $\rho_1 > \rho_2$ , а  $T_1 < T_2$ . Из рисунка видно, что в этом примере с течением времени плотность справа от начального разрыва плавно растет, а слева плавно падает.

На рис. 3 представлен пример расчета распределения температуры и плотности для второго случая. В начальный момент времени в области (1)  $0 < x < 0,1$  находится смесь  $CO_2 + SF_6$  с массовой концентрацией  $CO_2$   $c = 0,995$ , а в области (2)  $0,1 < x < 1$  находится чистый газ  $CO_2$  ( $c = 1$ ). Плотность и температура в левой части области выше, чем в правой ( $\rho_1 > \rho_2$  и  $T_1 > T_2$ ).

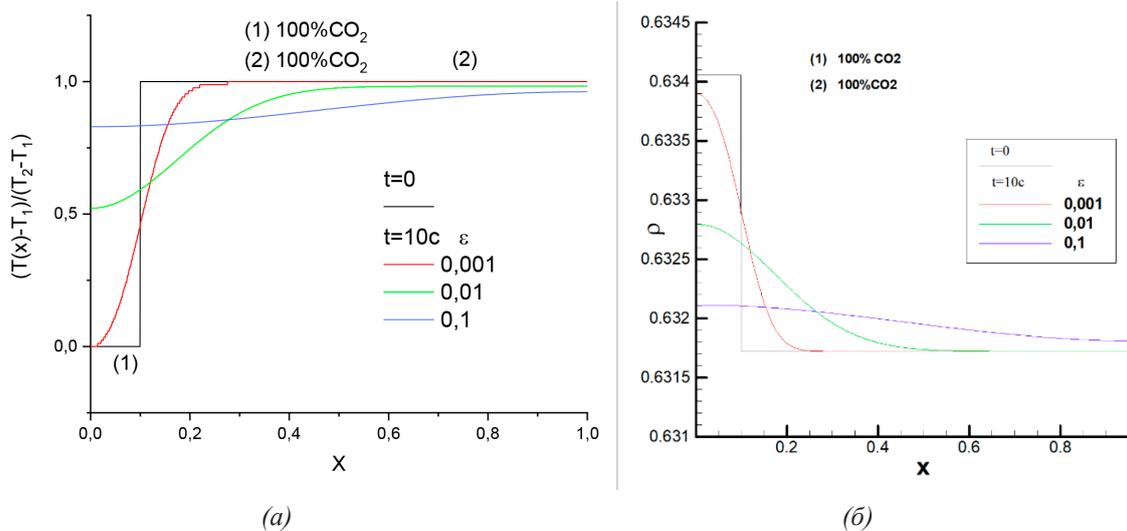


Рис. 2. Распределение температуры (а) и плотности (б) для чистого  $CO_2$  ( $\rho_1 > \rho_2$  и  $T_1 < T_2$ ) в начальный момент и через 10 с в зависимости от степени приближения к критической точке  $\epsilon = (T - T_{кр.}) / T_{кр.}$ .

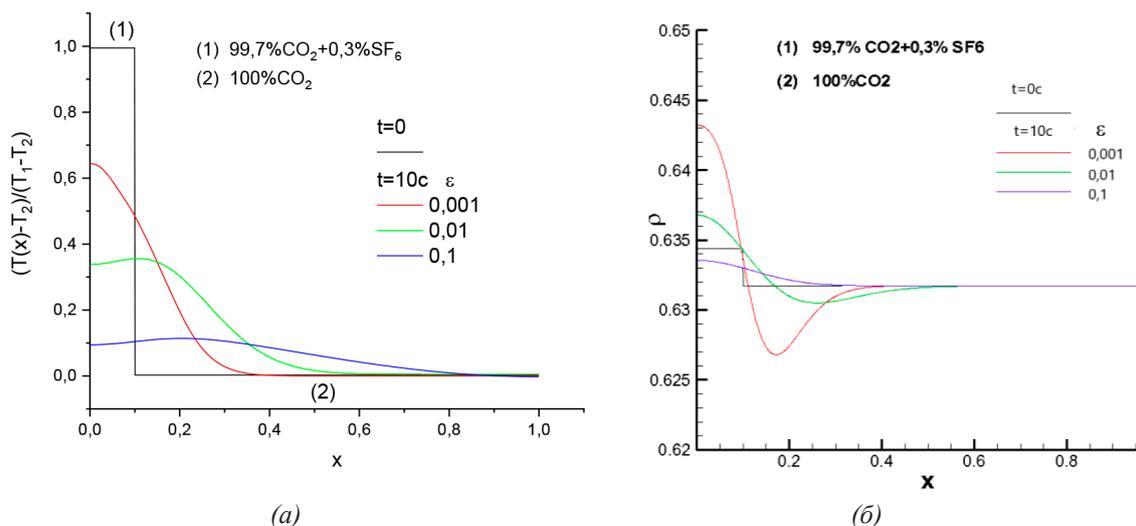


Рис. 3. Распределение температуры (а) и плотности (б) для смеси 99,7 %  $\text{CO}_2$  + 0,3 %  $\text{SF}_6$  слева (область (1)) и чистого  $\text{CO}_2$  справа (область (2)) от поверхности разрыва ( $\rho_1 > \rho_2$  и  $T_1 > T_2$ ) в начальный момент и через 10 с в зависимости от степени приближения к критической точке  $\epsilon = (T - T_{кр.}) / T_{кр.}$

Тем не менее величина давления слева и справа в начальный момент одна и та же ( $p_1 = p_2$ ). Такое возможно только в случае, когда слева и справа от поверхности разрыва находятся смеси с разными молекулярными весами. Видно, что процесс релаксации начального распределения плотности при этом имеет существенные отличия от первого случая. Характерной особенностью здесь является образование локального уплотнения со стороны более плотной в начальный момент среды слева от поверхности разрыва и локального разрежения справа, где изначально плотность была меньше. Интенсивность эффекта увеличивается при приближении к критической точке.

### Заключение

Проведено численное моделирование релаксации разрыва плотности и температуры при условии равенства начального давления по обе стороны от разрыва в однородной и неоднородной по составу сверхкритической бинарной смеси. В расчетах использовалась математическая модель, являющаяся модификацией системы уравнений для описания динамики и теплопереноса в однокомпонентной сверхкритической среде. Исходная модель была дополнена двумя уравнениями диффузии компонентов, а в качестве уравнения состояния использовалась сумма уравнений состояний компонентов с соответствующей поправкой, учитывающей взаимодействие молекул разных компонент. Пример расчета пистон-эффекта в однокомпонентной среде показал, что модифицированная и первоначальная модели дают

сходные результаты. В случае неоднородной по составу бинарной смеси получено, что существует область параметров, в которой режим релаксации характеризуется значительными локальными изменениями плотности слева и справа от начального разрыва. Показано, что интенсивность локальных изменений плотности растет при приближении к критической точке.

### Список литературы

1. Beysens D.A. Review on Transport Phenomena Near the Critical Point of Fluids Under Weightlessness // *Frontiers in Space Technologies*. 2022. Vol. 3 P. 1–19. DOI: 10.3389/frspt.2022.876642.
2. Zappoli D., Beysens D., Garrabos Y. Heat Transfers and Related Effects in Supercritical Fluids // *Fluid Mechanics and Its Applications (FMIA)*. Vol. 108). 2015. Springer Dordrecht. DOI: 10.1007/978-94-017-9187-8.
3. Guardone A., Colonna P., Pini M. and Spinelli A. Nonideal Compressible Fluid Dynamics of Dense Vapors and Supercritical Fluids // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2024. Vol. 56. P. 241–269. DOI: 10.1146/annurev-fluid-120720-03334.
4. Bakker R.J. Thermodynamic Properties and Applications of Modified van-der-Waals Equations of State, Thermodynamics – Fundamentals and Its Application in Science. Chapter 7. IntechOpen. 2012. P. 163–190. DOI: 10.5772/50315.
5. Kontogeorgis G.M., Privat R., Jaubert J.-N. Taking Another Look at the van der Waals Equation of State—Almost 150 Years Later // *J. Chemical & Engineering Data*. 2019. No. 64. P. 4619–4637. DOI: 10.1021/acs.jced.9b00264.
6. Gorbunov A.A., Kryukov A.P., Levashov V.Yu. Mechanical equilibrium of two-component gas mixtures. 2013.
7. Горбунов А.А., Емельянов В.М., Леднев А.К. Уравнение состояния бинарной смеси вблизи критической точки // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2022. № 9. С. 91–95. DOI: 10.17513/mjpf.13446.
8. Gorbunov A., Emelyanov V., Lednev A., Soboleva E. Dynamic and Thermal Effects in Supercritical Fluids under Various Gravity Conditions // *Microgravity Sci. Technol.* 2018. Vol. 30. Is. 1–2. P. 53–62. DOI: 10.1007/s12217-017-9574-5.

## НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 621.391.82

## ИНТЕГРАЦИЯ НЕНАЗЕМНОЙ СВЯЗИ (NTN) С 5G И ВЫШЕ

Шепелев С.В., Бабин А.И., Коротков М.В.

АО «МТУ Сатурн», Москва,

e-mail: SShepelev@k-tech.ru, ABabin@k-tech.ru, MKorotkov@k-tech.ru

**Аннотация.** В последнее время в мире связи наблюдается повышенный интерес к объединению технологий, соединению наземных и неназемных услуг мобильных сетей 4G/5G и в перспективе 6G, обеспечивая связь в удаленных районах и недоступных ситуациях. Целью статьи является научный обзор особенностей создания неназемных сетей NTN и гибридных сетей на этапах стандартизации технических параметров и диапазонов частот для сетей NTN в релизах 3GPP 16-18, рассмотрение организации работ по выбору диапазонов частот NTN Администрацией связи России. Платформы NTN представлены спутниковыми системами LEO, MEO, GEO, находящимися на различных орбитах, беспилотными летательными аппаратами, включая аэростатные платформы HAPS. Концепция реализации неназемных сетей в 5G представлена в релизе Rel.17 3GPP, где рассмотрены и стандартизованы основные технические компоненты NTN. Релиз Rel.18 3GPP будет включать в себя ряд обновлений: усовершенствования NTN-IoT, а также добавление в NTN-NR новых частот, сервисов и моделей трафика. Авторами рассмотрен мировой опыт стандартизации и применения диапазонов частот для NTN. Проанализирована организация работ по выбору диапазонов частот NTN Администрацией связи России. Создание отечественных спутниковых систем LEO и MEO позволит организовать на территории Российской Федерации гибридные сети LTE/5G и в перспективе 6G-NTN.

**Ключевые слова:** неназемные сети, наземные сети, гибридные сети, внеземной компонент, NTN, TN, NT, HAPS

## INTEGRATION OF NON-TERRESTRIAL COMMUNICATION (NTN) WITH 5G AND ABOVE

Shepelev S.V., Babin A.I., Korotkov M.V.

Joint-stock company MTU Saturn, Moscow,

e-mail: SShepelev@k-tech.ru, ABabin@k-tech.ru, MKorotkov@k-tech.ru

**Annotation.** Recently, there has been an increased interest in the world of communications in combining technologies, connecting terrestrial and non-terrestrial services of 4G/5G and, in the future, 6G mobile networks, providing communication in remote areas and inaccessible situations. The purpose of the article is a scientific review of the features of creating NTN networks and hybrid networks at the stages of standardization of technical parameters and frequency ranges for NTN networks in 3GPP releases 16-18, consideration of the organization of work on the selection of NTN frequency ranges by the Russian Communications Administration. NTN platforms are represented by LEO, MEO, GEO satellite systems in various orbits, unmanned aerial vehicles, including HAPS balloon platforms. The concept of implementing non-terrestrial networks in 5G is presented in the release Rel.17 3GPP, where the main technical components of NTN are reviewed and standardized. The release of Rel.18 3GPP will include a number of updates: improvements to NTN-IoT, as well as the addition of new frequencies, services and traffic models to NTN-NR. The authors consider the world experience of standardization and application of frequency ranges for NTN. The organization of work on the selection of NTN frequency ranges by the Russian Communications Administration is analyzed. The creation of domestic LEO and MEO satellite systems will make it possible to organize LTE/5G and, in the future, 6G-NTN hybrid networks on the territory of the Russian Federation.

**Keywords:** non-terrestrial networks, terrestrial networks, hybrid networks, extraterrestrial component, NTN, TN, NT, HAPS

Термин *NTN* (Non-Terrestrial Networks), неназемные сети, относится не только к спутниковой связи. На самом деле это относится к развертыванию любой неназемной сети с использованием внеземных компонентов *NT* (Non-Terrestria): спутников, аэростатов, самолетов или беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Сети NTN обеспечивают связь в районах, где наземные сети *TN* (Terrestrial Network) имеют сложности в развертывании, образуя гибридные сети. О необходимости развития гибридных сетей спутниковой и сотовой связи говорится в Стратегии развития телекоммуникационной отрасли до 2030 г.

Ключом к открытию этих новых услуг внеземной сети 5G (NTN) является объединение наземных и неzemных услуг путем повторного использования существующих опорных сигналов, существующих функций базовой сети 5G и форм-фактора сотовой трубки [1].

Целью работы является исследования особенностей создания сетей NTN и гибридных сетей NTN+TN на этапах стандартизации технических параметров и диапазонов частот для сетей NTN в релизах 3GPP 16–18, рассмотрение организации работ по выбору диапазонов частот NTN Администрацией связи России.

### Материалы и методы исследования

При проведении научного обзора применяются теоретические (анализ, синтез) и логические методы (факты и умозаключения) исследований.

В техническом отчете Rel.16 3GPP спецификации TS 38.821 [2] платформы NTN определяются с точки зрения спутников, находящихся на различных орбитах, включая платформы *HAPS* (High-Altitude Platform Station) в виде аэростатов.

Неназемные сети NTN обычно относятся к сетям связи, которые не зависят исключительно от традиционной наземной инфраструктуры и используют различные наземные технологии и платформы для обеспечения подключения. Вот несколько ключевых элементов и примеров NTN:

– *Спутниковые сети*: Спутники на геостационарной орбите или на более низких околоземных орбитах (LEO) обеспечивают широкополосный доступ в Интернет, телекоммуникационные услуги и передачу данных в отдаленные и недостаточно обслуживаемые районы.

– *Высотные платформы HAPS*: на больших высотах в атмосфере Земли, такие как стратосферные воздушные шары или беспилотные летательные аппараты на солнечной энергии. Они могут служить ретрансляционными станциями для беспроводной связи.

– *Воздушные платформы*: В некоторых решениях NTN используются БПЛА (беспилотные летательные аппараты), оснащенные коммуникационным оборудованием, для создания временных сетей связи, особенно в районах, пострадавших от стихийных бедствий, или во время мероприятий, где традиционной инфраструктуры недостаточно.

– *Гибридные подходы*: Некоторые решения NTN сочетают в себе различные технологии, такие как комбинация спутников и высотных платформ, для расширения покрытия сети и повышения надежности.

На рисунке представлены варианты архитектуры NTN, классифицированные по роли внеземного компонента NT в общей коммуникационной цепи наземной сети TN: на (а) платформа NT в качестве пользователя; на (б) в качестве ретранслятора для обратной транспортировки трафика; на (в) в качестве ретранслятора для конечных пользователей; на (д) в качестве базовой станции [3].

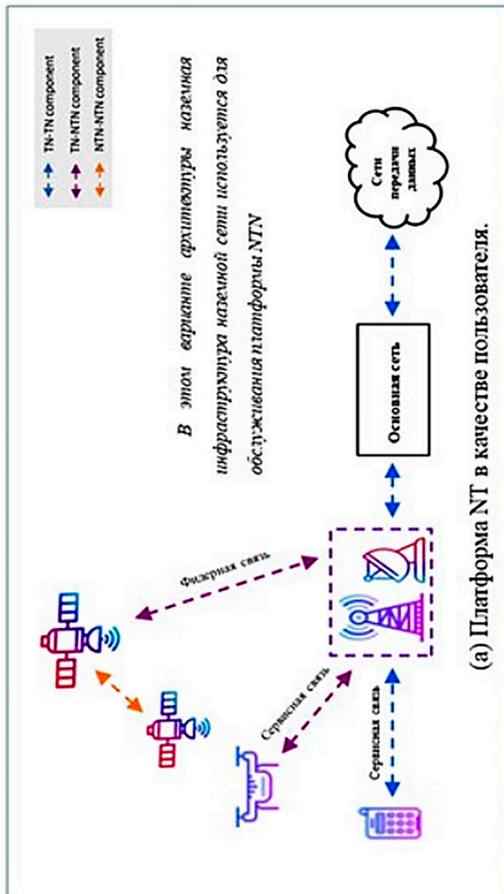
В спецификации TR 21.917 релизе Rel.17 3GPP [4] описаны требования для спутниковой связи 5G. 3GPP разделяет спутники по типу орбит и платформ: низкоорбитальные *LEO* (Low-Earth Orbit) с орбитой от 300 до 2000 км; среднеорбитальные *MEO* (Medium-Earth Orbit) с орбитой от 8000 до 20000 км и геостационарные *GEO* (Geostationary Earth Orbit) с высотой орбиты 35786 км. В табл. 1 представлены характеристики таких спутниковых платформ. Системы GEO и БПЛА используются в основном для обеспечения регионального или местного покрытия, при этом радиолучи, как правило, остаются фиксированными по отношению к мобильному устройству или устройству. Платформы LEO (низкая околоземная орбита) и MEO (средняя околоземная орбита) могут использоваться для предоставления услуг как в Северном, так и в Южном полушариях, однако эти спутники и связанные с ними радиолучи будут перемещаться относительно мобильного телефона или устройства по мере того, как они вращаются вокруг Земли [4].

Неназемные сети имеют два направления сценария услуг: NTN-IoT и NTN-NR. В устройства (смартфоны, носимые устройства и автомобили) могут встраиваться чип-сетей NTN NB-IoT для реализации экстренного вызова и двунаправленной передачи сообщений в регионах, не имеющих доступа к наземным сетям TN. Возможность отслеживания ценных ресурсов (например, грузовые контейнеры или транспортные средства) при их транспортировке в районах с ограниченным доступом к сотовым сетям связи.

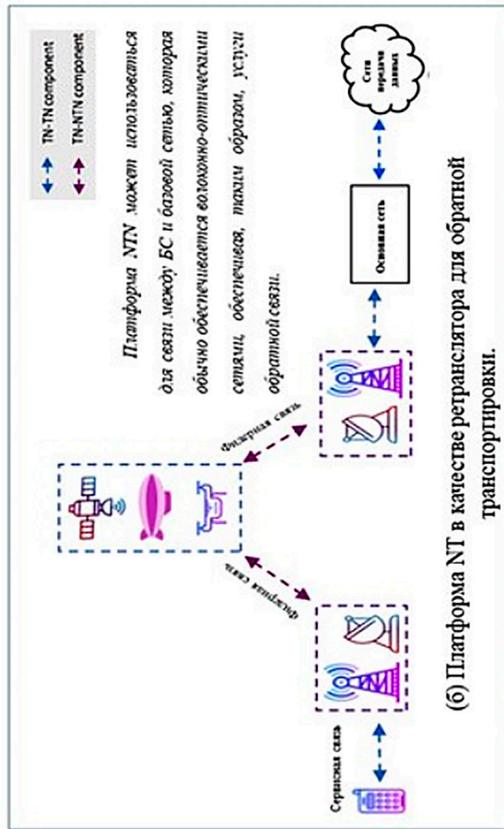
Таблица 1

Характеристики спутниковых платформ

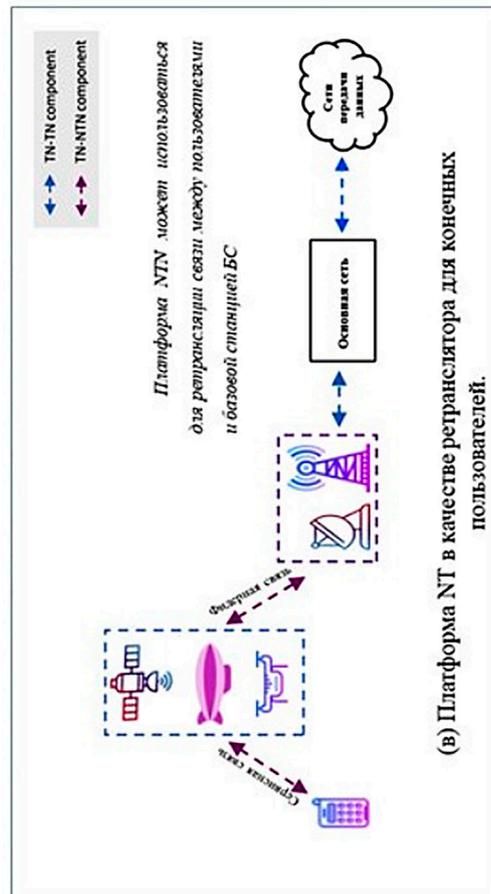
Тип орбиты	Угол места 90°		Угол места 10°		Максимальная односторонняя задержка от телефона до шлюза, мс
	Расстояние до спутника (высота орбиты), км	Задержка сигнала от телефона/шлюза до спутника, мс	Расстояние до спутника, км	Задержка сигнала от телефона/шлюза до спутника, мс	
LEO	600	2	1932	6	12
MEO	8000	27	11826	39	79
GEO	35786	119	40586	135	271



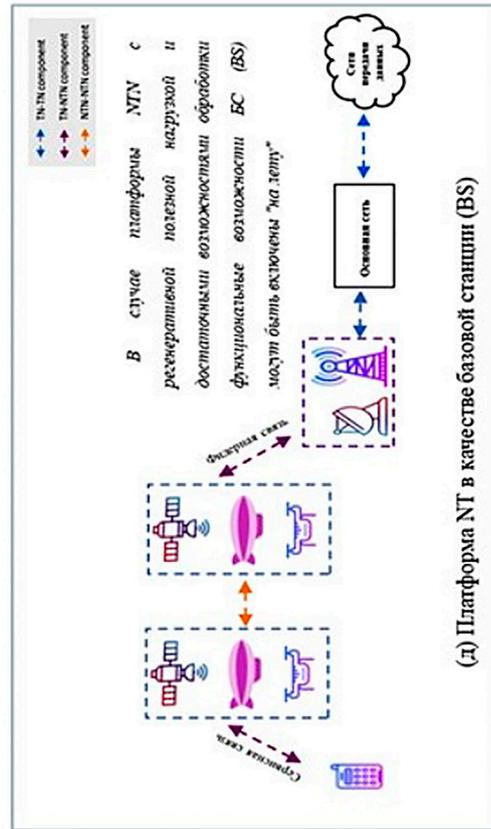
(а) Платформа NT в качестве пользователя.



(б) Платформа NT в качестве ретранслятора для обратной транспортировки.



(в) Платформа NT в качестве ретранслятора для конечных пользователей.



(д) Платформа NT в качестве базовой станции (BS)

Варианты архитектуры NTN, классифицированные по роли компонента NT в общей коммуникационной цепи наземной сети

Технология NTN-NR расширяет спектр возможностей наземных сетей за счет предоставления аналогичных сервисов, как NTN-IoT, но в значительно более крупных масштабах. Наземные сети повышают надежность и интенсивность использования фиксированного беспроводного доступа 5G FWA, упрощенный роуминг 5G, эффективно выполнять функции транспортной сети для сетей 5G.

### Результаты исследования и их обсуждение

Релиз Rel.17 3GPP был посвящен реализации наземных сетей в 5G, тогда как Rel.18 3GPP включает в себя обновления: усовершенствования NTN-IoT, а также добавление в NTN-NR новых частот, сервисов и моделей трафика [5, с. 42].

Спецификация 3GPP TS 38.108 и TS 37.340 [6] устанавливает минимальные ВЧ-характеристики и требования к производительности спутниковых узлов доступа NR (SAN) в сетях 5G. Она гарантирует, что узлы SAN соответствуют требованиям действующих стандартов для обеспечения надежной и эффективной связи через каналы спутниковой связи, путем определения следующих параметров: мощность передачи, чувствительность приемника, диапазон частот, схемы модуляции и полосы пропускания каналов. Сценарии аттестационных испытаний ВЧ-характеристик для спутниковых узлов доступа определены в спецификации 3GPP TS 38.181.

Согласно стандарту Международного союза электросвязи ITU-T G.107, минимальная односторонняя задержка (от одного абонента до другого), которую абонент может заметить при телефонном разговоре, составляет около 100–150 мс [7]. 3GPP специфицирует спутниковую связь для мощности передатчика абонентского устройства UE класса 3 (излучаемая мощность  $23 \pm 2$  дБм или 200 мВт) в S-диапазоне (2ГГц) с нена-

правленной антенной [8]. Спецификации 3GPP TS 31.102 и TS 23.122 требуют SIM-карту для системы NTN с поддержкой «satellite NG-RAN» [9].

В ходе проведения в феврале 2024 г. Всемирного ежегодного мобильного Конгресса и выставки MWC 2024 был учрежден альянс, который инициирован ассоциациями GSMA (Ассоциация операторов мобильной связи) с GSOA (Глобальная ассоциация спутниковых операторов) с целью содействия интеграции наземных и наземных (NTN) сетей. GSA (Глобальная ассоциация поставщиков мобильной связи) тоже планирует присоединиться. GSA в 2023–2024 гг. зарегистрировала 13 организаций, которые в настоящее время планируют запустить услугу «Спутник – мобильный телефон».

### Мировой опыт стандартизации применения диапазонов частот для NTN

Спецификации 3GPP Release 18 в настоящее время не определяют огромный список поддерживаемых частотных диапазонов для доступа к спутниковым устройствам 5G NTN. В табл. 2 показаны основные диапазоны частот NTN. В NTN FR1 (диапазон частот 1), охватывает диапазон от 410 до 7125 МГц. Для спутниковой связи в релизе Rel.17 3GPP спецификациями TS 38.108 и TS 38.133 выделялись специальные частотные поддиапазоны n256 и n255. Они образуют предложение диапазона 5G NTN для L-диапазона и S-диапазона, что соответствует существующей терминологии спутникового диапазона. Напротив, NTN FR2 (диапазон частот 2) охватывает диапазон от 17300 до 30000 МГц и является частью спутникового диапазона Ka. Что касается 5G NTN, то в настоящее время предлагается три спутниковых диапазона FR2 NTN: n510, n511 и n512.

Как и многие каналы связи Ka-диапазона, нисходящий диапазон (спутник – наземная станция) является нижней частотой.

Таблица 2

Диапазоны частот 3GPP для систем NTN

Стандартизированные диапазоны частот 3GPP для сетей NTN		Uplink (от наземного терминала к спутнику)	Downlink (от спутника к наземному терминалу)
3GPP NTN FR1 (L и S диапазоны)	n256 (FDD)	1980–2010 МГц	2170–2200 МГц
	n255 (FDD)	1626,5–1660,5 МГц	1525–1559 МГц
3GPP NTN FR2 (Ka диапазон)	n510 (FDD)	27,5–28,35 ГГц	17,7–20,2 ГГц
	n511 (FDD)	28,35–30,0 ГГц	17,7–20,2 ГГц
	n512 (FDD)	27,5–30,0 ГГц	17,7–20,2 ГГц

Выбор диапазона связан с различными нормативными требованиями в разных странах, например, диапазон n512 применим в странах Европы, на которые распространяются решения СЕРТ (Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных администраций) ЕСС (Комитет по электронным коммуникациям) Европы. Диапазоны n511/n512 применимы в США и регулируются различными правилами FCC (Федеральной комиссии по связи США).

*Предложения по диапазонам частот NTN Администрации связи России*

Согласно Плану подготовки Администрации связи Российской Федерации к Всемирной конференции радиосвязи 2027 г. (далее ВКР-27), утвержденному ГКРЧ России от 29.03.2024 №24-72-03, пунктом 1.7 повестки дня ВКР-27 в соответствии с Резолюцией 256 (ВКР-23) [10, с. 499] ставится задача рассмотреть результаты исследований совместного использования частот и совместимости для использования Международной подвижной электросвязи (ИМТ) в полосах частот 4400–4800 МГц, 7125–8400 МГц (или ее частях) и 14,8–15,35 ГГц с учетом существующих первичных служб, работающих в тех же самых и соседних полосах частот. Полосы частот 4400–4800 МГц и 7125–8400 МГц будут рассматриваться для наземных сетей TN 5G/6G. Полоса частот 14,8–15,35 ГГц будет рассмотрена для наземных сетей 5G NTN. Согласно пункту 1.13 повестки дня ВКР-27, в соответствии с Резолюцией 253 (ВКР-23) [10, с. 490] ставится задача рассмотреть результаты исследования возможных новых распределений подвижной спутниковой службе (ПСС) для прямого подключения между космическими станциями и пользовательским оборудованием Международной подвижной электросвязи (ИМТ) в дополнение к покрытию наземных сетей ИМТ 5G-Advanced/6G. Новые распределения ПСС возможны в полосах частот 2010–2025 МГц (Земля – космос) и 2160–2170 МГц (космос – Земля) в районах 1 и 3 и в полосе частот 2120–2160 МГц (космос – Земля) во всех районах 1–3 в соответствии с Резолюцией 254 (ВКР-23) [10, с. 493], и это будет рассмотрено пунктом 1.14 повестки дня ВКР-27.

**Заключение**

Системы 5G и более поздние версии будут все больше и больше полагаться на внеземные компоненты NTN для предоставле-

ния своих услуг. Это связано с их уникальными возможностями по расширению зоны покрытия в районах, где наземная инфраструктура недоступна или экономически неэффективна, а также с их дополнительной ролью в разгрузке важной части трафика, особенно в сильно перегруженных районах. Высотные платформы и спутники могут обеспечивать прямую связь на линии прямой видимости, потенциально сокращая задержки и повышая скорость передачи данных. Спутники LEO могут обеспечивать меньшую задержку из-за их большей близости к Земле. Для эффективного распределения ресурсов спектра между наземными и внеземными системами могут быть использованы механизмы динамического распределения спектра. Рабочая группа ГКРЧ во главе с НИИР рассматривает предложения по выбору полос частот для построения гибридных сетей NTN+TN на территории Российской Федерации.

**Список литературы**

1. Бабин А.И., Тихвинский В.О. Спутниковая связь в будущей инфраструктуре 5G // Connect. 2018. № 7–8. С. 104–107.
2. ETSI 3GPP TR 38.821: Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN). Release 16. Version 16.2.0. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/3525> (дата обращения: 21.02.2024).
3. Mahdi Azari M., Solanki S., Chatzinotas S., Kodheli O., Sallouha H., Colpaert A. Evolution of Non-Terrestrial Networks from 5G to 6G: A Survey. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/353258107.pdf> (дата обращения: 02.02.2024).
4. Стрелец В.А. Вопросы стандартизации спутникового сегмента ИМТ-2020/5G в международных организациях // Электросвязь. 2020. № 10. С. 6–11.
5. ETSI 3GPP TR 21.917: Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; 5G. Version 17.0.1 Release 17, 2023. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/121917v170001p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/121917v170001p.pdf) (дата обращения: 01.02.2024).
6. Тихвинский В.О., Девяткин Е.Е., Белявский В.А. По пути от 5G к 5G-Advanced: релизы 17 и 18 // Первая миля. 2021. № 6. С. 38–47.
7. Grem Grin, Non Terrestrial Networks and 5G. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mpirical.com/blog/non-terrestrial-networks-and-5g> (дата обращения: 19.02.2024).
8. ETSI 3GPP TS 37.340: NR; multi-connectivity; overall description; stage-2, Version 18.1.0, Release 18. 2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/3198> (дата обращения: 12.02.2024).
9. 6G Innovation Centre. 6G wireless: a new strategic vision / 5GIC Strategy Advisory Board. Retrieved from, 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.surrey.ac.uk/sites/default/files/2020-11/6g-wireless-a-new-strategic-vision-paper.pdf> (дата обращения: 16.02.2024).
10. Всемирная конференция радиосвязи 2023 (ВКР-23) / Заключительные акты // ITU-Публикации. Дубай, 2023. 794 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.itu.int/wrc-23/documents.pdf> (дата обращения: 03.02.2024).

## СТАТЬЯ

УДК 517.968

**ОБ ОДНОЙ СИСТЕМЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ  
УРАВНЕНИЙ ВОЛЬТЕРРА ПЕРВОГО РОДА****Сапарова Г.Б., Зулпукаров Ж.А.***Ошский технологический университет, Ош,  
e-mail: gulya141005@mail.ru, zulpukarov66@mail.ru*

**Аннотация.** В последнее время наблюдается резкий интерес к теории интегральных уравнений, называемых некорректными задачами, поэтому исследование таких задач актуально, что связано с важностью данной темы. Интегральные уравнения являются важными приложениями в области математики, так как они являются активно развивающимися в приложениях таких наук, как физика, техника, аэродинамика, электродинамика. Теория интегральных уравнений Вольтерра очень интенсивно развивается в настоящее время, но все еще слабо развиты и мало изучены системы таких уравнений первого и третьего родов. Также недостаточно исследованы методы регуляризации и численные решения систем этих уравнений в том случае, когда известная функция при заданной функции вне интеграла обращается в нуль во внутренних точках отрезка. В данной работе исследовано решение системы интегрального уравнения Вольтерра первого рода в случае двух независимых переменных. Так как системы уравнений до конца еще не рассмотрены в пространствах обобщенных функций и найти их точное решение можно только в очень редких частных случаях, особенно актуальной является разработка приближенных методов их решения, то есть в виде построения регуляризации в классах обобщенных функций с соответствующим теоретическим обоснованием.

**Ключевые слова:** решение, регуляризация, лемма, резольвента, системы, формула, метод

**ABOUT ONE SYSTEM OF VOLTERRA INTEGRAL  
EQUATIONS OF THE FIRST KIND****Saparova G.B., Zulpukarov Zh.A.***Osh Technological University, Osh, e-mail: gulya141005@mail.ru, zulpukarov66@mail.ru*

**Annotation.** Recently, there has been a sharp interest in the theory of integral equations, called ill-posed problems, so the study of such problems is relevant, which is due to the importance of this topic. Integral equations are important applications in the field of mathematics, since they are actively developing in applications of such sciences as: physics, technology, aerodynamics, electrodynamics. The theory of Volterra integral equations is developing very intensively at the present time, but systems of such equations of the first and third kind are still poorly developed and little studied. Also, regularization methods and numerical solution of systems of these equations have not been sufficiently studied in the case when a known function, for a given function outside the integral, vanishes at the interior points of the segment. In this paper, the solution to the system of Volterra integral equations of the first kind is investigated in the case of two independent variables. Since systems of equation have not yet been fully considered in the spaces of generalized functions and their exact solution can be found only in very rare special cases, the development of approximate methods for solving them is especially relevant, that is, in the form of constructing a regularization in classes of generalized functions with an appropriate theoretical justification.

**Keywords:** solution, regularization, lemma, resolvent, systems, formula, method

Интегральные уравнения Вольтерра очень широко применяются в задачах астрономии, биологии, экологии, электродинамики и механики [1]. С каждым днем все больше появляются новые области, где находят свои применения интегральные уравнения Вольтерра первого, второго и третьего родов. В работах А. Асанова, М. Иманалиева, С. Искандарова рассмотрены методы регуляризации, с помощью которых в теории интегральных уравнений Вольтерра первого и третьего родов доказывается существование и единственность решения [2, 3].

Интегральные уравнения Вольтерра первого рода являются некорректными за-

дачами, и для их решения не могут быть применены стандартные методы, чтобы найти их решение, был использован метод приближенных решений, которые применяли в своих трудах В.О. Сергеев, Ж.А. Зулпукаров, Г.Б. Сапарова [4–6].

**Материалы и методы исследования**

В данной работе исследована система интегральных уравнений Вольтерра первого рода, в случае с двумя независимыми переменными, с помощью сингулярно-возмущенных уравнений методом регуляризации были доказаны существование и единственность решения данной системы.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассматривается система

$$\int_0^t K(t, x, s) u(s, x) ds + \int_0^t \int_0^x N(t, x, s, z) u(s, z) dz ds = f(t, x), (t, x) \in G, \quad (1)$$

где  $K(t, x, s)$  и  $N(t, x, s, z)$  –  $(n \times n)$  – матрицы функции, а  $u(t, x)$  – искомая и  $f(t, x)$  – заданная  $n$  – мерные вектор-функции на  $G = \{(t, x): 0 \leq t \leq T, 0 \leq x \leq X\}$ ,  $f(0, x) = 0$  при  $x \in [0, X]$ .

Введем норму, для  $n \times n$  – матрицы  $A = (a_{ij})$  следующим образом:

$$\|A\| = \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \text{ и для } n\text{-мерных векторов } u = (u_1, \dots, u_n) \text{ в виде } \|A\| = \left( \sum_{i=1}^n u_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Введем переменную

$$\lambda(t, x, t) = \min_i \{ \lambda_i(t, x) \}, (t, x) \in G, i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Потребуем выполнение следующих условий:

а)  $\|K(t, x, s)\| \in C(G_1)$ ,  $\|N(t, x, s, z)\| \in C(G_2)$ ,  $\|K(t, x, t)\| \leq N_0 \lambda_0(t)$  и  $\lambda(t, x) \geq \lambda_0(t)$  при  $(t, x) \in G$ , где  $N_0 = \text{const}$ ,  $\lambda_0(t)$  – определена с помощью формулы (2),  $\lambda_0(t) \in L_1(0, T)$ ;

б) при  $t > \tau$  для любых  $(t, x, s), (\tau, x, s) \in G_1 = \{(t, x, s): 0 \leq s \leq t \leq T; 0 \leq x \leq X\}$  справедливо

$$\|K(t, x, s) - K(\tau, x, s)\| \leq C \int_{\tau}^t \lambda_0(s) ds,$$

где  $0 < C = \text{const}$ ;

в) при  $t > \tau$  для любых  $(t, x, s, z), (\tau, x, s, z) \in G_2 = \{(t, x, s, z): 0 \leq s \leq t \leq T; 0 \leq z \leq x \leq X\}$  справедливо

$$\|N(t, x, s, z) - N(\tau, x, s, z)\| \leq C_1 \int_{\tau}^t \lambda_0(s) ds,$$

где  $0 < C_1 = \text{const}$  и  $N(t, x, t, z) \equiv 0$  при  $(t, x, z) \in G_4 = \{(t, x, z): 0 \leq t \leq T; 0 \leq z \leq x \leq X\}$ ;

Наряду с системой (1) рассмотрим систему

$$\varepsilon u(t, x, \varepsilon) + \int_0^t K(t, x, s) u(s, x, \varepsilon) ds + \int_0^t \int_0^x N(t, x, s, z) u(s, z, \varepsilon) dz ds = f(t, x), \quad (3)$$

где  $0 < \varepsilon$  – малый параметр.

Решение системы (3) будем искать в виде

$$u(t, x, \varepsilon) = u(t, x) + \varphi(t, x, \varepsilon), (t, x) \in G. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), имеем

$$\varepsilon \varphi(t, x, \varepsilon) + \int_0^t K(t, x, s) \varphi(s, x, \varepsilon) ds + \int_0^t \int_0^x N(t, x, s, z) \varphi(s, z, \varepsilon) dz ds + \varepsilon u(t, x) = 0. \quad (5)$$

Из (5) получаем следующую систему:

$$\begin{aligned} \varphi(t, x, \varepsilon) + \frac{1}{\varepsilon} \int_0^t K(s, x, s) \varphi(s, x, \varepsilon) ds &= \int_0^t [K(t, x, s) - K(s, x, s)] \varphi(s, x, \varepsilon) ds - \\ &- \int_0^t \int_0^x N(t, x, s, z) \varphi(s, z, \varepsilon) dz ds - u(t, x) = 0. \quad (6) \end{aligned}$$

Резольвента матричного ядра  $\left( -\frac{K(s, x, s)}{\varepsilon} \right)$  имеет вид

$$R(t, x, s, \varepsilon) = -\frac{1}{\varepsilon} X(t, x, s, \varepsilon) K(s, x, s), \quad \varepsilon > 0, \quad (7)$$

где  $X(t, x, y, s, \varepsilon)$  – матричная функция Коши системы  $\varepsilon X_t^1(t, x, s) = -K(t, x, t) X(t, x, s, \varepsilon)$ ,  $X(t, x, s, \varepsilon) = E_n$ ,  $E_n$  – единичная матрица.

Отметим следующие свойства матричной функции  $X(t, x, s, \varepsilon)$ :

$$1^0. X(t, x, s, \varepsilon) = X(t, x, \varepsilon) \cdot X^{-1}(s, x, \varepsilon), \quad (8)$$

где  $X^{-1}(t, x, y, \varepsilon)$  – обратная матрица матрицы  $X(t, x, y, \varepsilon)$

$$2^0. [X(t, x, s, \varepsilon)]_s^1 = -\frac{1}{\varepsilon} X(t, x, s, \varepsilon) K(s, x, s), \quad (9)$$

$$[X(t, x, s, \varepsilon)]_s^1 = -\frac{1}{\varepsilon} K(t, x, t) X(t, x, s, \varepsilon). \quad (10)$$

3<sup>0</sup>. В силу неравенств Важевского и в силу условия а) имеет место

$$X(t, x, s, \varepsilon) \leq \sqrt{n} \exp \left\{ -\frac{1}{\varepsilon} \int_{s_0}^t (\tau) d\tau \right\}, (t, x, s) \in G_1 \quad (11)$$

Далее, с помощью резольвенты  $R(t, x, y, s, \varepsilon)$ ,

$$\begin{aligned} \varphi(t, x, \varepsilon) = & -\frac{1}{\varepsilon} \int_0^t [K(t, x, s) - K(s, x, s)] \varphi(s, x, \varepsilon) ds + \frac{1}{\varepsilon^2} \int_0^t \int_0^s X(t, x, s, \varepsilon) K(s, x, s) \times \\ & \times [K(s, x, \tau) - K(\tau, x, \tau)] \varphi(\tau, x, \varepsilon) d\tau ds - \frac{1}{\varepsilon^2} \int_0^t \int_0^x N(t, x, s, \varepsilon) \varphi(s, z, \varepsilon) dz ds + \\ & + \frac{1}{\varepsilon} \int_0^t \int_0^s \int_0^x X(t, x, s, \varepsilon) K(s, x, s) N(s, x, \tau, z) \varphi(\tau, z, \varepsilon) dz d\tau ds - u(t, x) + \\ & + u(t, x) + \frac{1}{\varepsilon} \int_0^t X(t, x, s, \varepsilon) K(s, x, s) \varphi(s, x, \varepsilon) ds. \end{aligned}$$

Используя формулу Дирихле и учитывая (9), (10), последнюю преобразуем к следующему виду:

$$\varphi(t, x, \varepsilon) = \int_0^t H(t, x, s, \varepsilon) \varphi(s, x, \varepsilon) ds + \int_0^t \int_0^x N_1(t, x, s, z, \varepsilon) \varphi(s, z, \varepsilon) dz ds + F(t, x, \varepsilon), \quad (12)$$

$$\text{где } H(t, x, s, \varepsilon) = -\frac{1}{\varepsilon} X(t, x, s, \varepsilon) [K(t, x, s) - K(s, x, s)] -$$

$$-\frac{1}{\varepsilon^2} \int_s^t X(t, x, \tau, \varepsilon) K(\tau, x, \tau) [K(t, x, s) - K(\tau, x, s)] d\tau. \quad (13)$$

$$N_1(t, x, s, \varepsilon) = -\frac{1}{\varepsilon} X(t, x, s, \varepsilon) N(t, x, s) - \frac{1}{\varepsilon^2} \int_s^t X(t, x, \tau, \varepsilon) K(\tau, x, \tau) \times [N(t, x, s, z) - N(\tau, x, s, z)] d\tau. \quad (14)$$

$$F(t, x, \varepsilon) = -X(t, x, 0, \varepsilon) u(t, x) - \frac{1}{\varepsilon} \int_0^t X(t, x, \tau, \varepsilon) K(\tau, x, \tau) [u(t, x) - u(s, x)] ds. \quad (15)$$

В дальнейшем используем следующие леммы.

Лемма 1. Пусть выполняются условия а), б), в) и г). Матричные функции  $H(t, x, s, \varepsilon)$ , и  $N_1(t, x, s, z, \varepsilon)$  определены соответственно с помощью формул (13) и (14). Тогда справедливы оценки

$$\|H(t, x, s, \varepsilon)\| = C_3, \quad (t, x, s) \in G_1, \quad \varepsilon > 0, \quad (16)$$

$$\|N_1(t, x, s, z, \varepsilon)\| = C_4, \quad (t, x, s, z) \in G_2, \quad \varepsilon > 0, \quad (17)$$

где  $C_3 = C\sqrt{n}(e^{-1} + N_0)$ ,  $C_4 = C_1\sqrt{n}(e^{-1} + N_0)$ ,  $N_0 > 0$ .

Доказательство. В силу условий а) – б) из (13) имеем

$$\|H(t, x, s, \varepsilon)\| \leq \frac{1}{\varepsilon} \|H(t, x, s, \varepsilon)\| C \int_s^t \lambda_0(\tau) d\tau + \frac{1}{\varepsilon^2} \int_s^t \|X(t, x, \tau, \varepsilon)\| N_0 \lambda_0(\tau) C \left( \int_\tau^t \lambda_0(s) ds \right) d\tau.$$

В этом случае в силу (11) для первого слагаемого имеем

$$\frac{1}{\varepsilon} \|X(t, x, s)\| C \int_s^t \lambda_0(\tau) d\tau = \frac{\sqrt{n}}{\varepsilon} + e^{\int_s^t \lambda_0(\tau) d\tau} C \int_s^t \lambda_0(\tau) d\tau = \left| \mu = \frac{1}{\varepsilon} \int_s^t \lambda_0(\tau) d\tau \right| = C\sqrt{n}\mu e^{-\mu} \leq C\sqrt{n}e^{-1}.$$

Для второго слагаемого справедливо соотношение

$$\begin{aligned} \frac{1}{\varepsilon^2} \int_s^t \|X(t, x, \tau, \varepsilon)\| N_0 \lambda_0(\tau) C \left( \int_\tau^t \lambda_0(s) ds \right) d\tau &= \frac{1}{\varepsilon^2} \int_s^t \sqrt{ne^{\int_s^t \lambda_0(\tau) d\tau}} N_0 \times \\ \times \lambda_0 C \left( \int_\tau^t \lambda_0(s) ds \right) &= \left| \begin{array}{l} \mu = \frac{1}{\varepsilon} \int_s^t \lambda_0(\tau) d\tau \\ d\mu = -\frac{1}{\varepsilon} \lambda_0(\tau) d\tau \end{array} \right| = CN_0 \sqrt{n} (-1) \frac{1}{\varepsilon} \int_{\frac{1}{\varepsilon} \int_s^t \lambda_0(\tau) d\tau}^t \mu e^{-\mu} d\mu \leq \\ &\leq CN_0 \sqrt{n} \int_0^\infty \mu e^{-\mu} d\mu \leq CN_0 \sqrt{n}. \end{aligned}$$

Следовательно, лемма 1 доказана.

Аналогично этому можно получить оценки (17).

Лемма 2. Пусть функция  $F(t, x, \varepsilon)$  определена формулой (15). Если  $u(t, x) \in C_n(G)$ ;  $u(0, x) = 0$  при  $x \in [0, X]$  и  $\lambda_0(t) > 0$  при почти всех  $t \in [0, T]$ ,  $\varphi(t) = \int_0^t \lambda_0(s) ds$ ,  $t \in [0, T]$ ,  $\|K(t, x, t)\| = N_0 \lambda_3(t)$ , то справедлива оценка

$$\|F(t, x, \varepsilon)\| \leq (2N_0 + 1) \sqrt{ne^{-\frac{1}{\varepsilon^{1-\beta}}}} \|u(t, x)\|_C + (N_0 + 1) \omega_u(\varepsilon^\beta) \sqrt{n}, \quad (18)$$

где  $\beta \in (0, 1)$ ,  $\omega_u(\delta) \leq SUP |u(\varphi^{-1}(v), x) - u(\varphi^{-1}(v_0), x)|$ .

$\varphi^{-1}(\vartheta)$  – обратная функция к  $\varphi(t) = \int_0^t \lambda_0(s) ds$ , т.е.  $\varphi^{-1}(\varphi(t)) = t, \varphi(\varphi^{-1}(\vartheta))$ .

Доказательство. 1) Пусть  $0 \leq t \leq \varphi^{-1}(\varepsilon^\beta), 0 < \beta < 1$ . Тогда из (18) имеем

$$\begin{aligned} \|F(t, x, \varepsilon)\| &\leq \left\| -X(t, x, 0)u(t, x) - \frac{1}{\varepsilon} \int_0^t X(t, x, s) K(s, x, s) [u(t, x) - u(s, x)] ds \right\| \leq \\ &\leq \omega_u(\varepsilon^\beta) \sqrt{ne^{-\frac{1}{\varepsilon^{\varphi(t)}}}} + \omega_u(\varepsilon^\beta) \int_0^t \frac{\sqrt{n}}{\varepsilon} N_0 e^{-\frac{1}{\varepsilon}[\varphi(t) - \varphi(s)] d\tau} \lambda_0(s) ds \leq \\ &\leq \omega_u(\varepsilon^\beta) \sqrt{n} (1 - N_0) e^{-\frac{1}{\varepsilon^{\varphi(t)}}} + \omega_u(\varepsilon^\beta) \sqrt{n} \leq (1 + N_0) \sqrt{n} \omega_u(\varepsilon^\beta). \end{aligned} \quad (19)$$

2) Если  $\varphi^{-1}(\varepsilon^\beta) \leq t \leq T$ , то

$$\|X(t, x, s, \varepsilon)u(t, x)\| \leq \|u(t, x)\|_C \sqrt{n} e^{-\frac{1}{\varepsilon^{1-\beta}}}, \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & \left\| \frac{1}{\varepsilon} \int_0^{\varphi^{-1}(\varphi(t)-\varepsilon^\beta)} X(t, x, s, \varepsilon) K(s, x, s) [u(t, x) - u(s, x)] ds + \frac{1}{\varepsilon} \int_{\varphi^{-1}(\varphi(t)-\varepsilon^\beta)}^t X(t, x, s, \varepsilon) \times \right. \\ & \left. \times [u(t, x) - u(s, x)] ds \right\| \leq 2N_0 \sqrt{n} \|u(t, x)\|_C e^{-\frac{1}{\varepsilon^{1-\beta}}} + N_0 \sqrt{n} \omega_u(\varepsilon^\beta). \end{aligned} \quad (21)$$

Учитывая (19), (20) и (21), из (15) получаем оценку (18).

Лемма 2 доказана.

В силу оценок (16), (17) и (18) из (12) получим

$$\|\varphi(t, x, \varepsilon)\| \leq a(t, x, \varepsilon) + \int_0^t C_3 \|\varphi(s, x, \varepsilon)\| ds, \quad (t, x) \in G \quad (22)$$

$$\text{где } a(t, x, \varepsilon) \leq C_0(\varepsilon) + \int_0^t \int_0^x C_4 \|\varphi(s, z, \varepsilon)\| dz ds, \quad (23)$$

$$C_0(\varepsilon) \leq (2N_0 + 1) e^{-\frac{1}{\varepsilon^{1-\beta}}} \sqrt{n} \|u(t, x)\|_C + (N_0 + 1) \omega_u(\varepsilon^\beta) \sqrt{n}.$$

На основе леммы 1 неравенство (22) перепишем в следующем виде:

$$\|\varphi(t, x, \varepsilon)\| \leq a(t, x, \varepsilon) + \int_0^t C_3 e^{C_3(t-s)} a(s, x, \varepsilon) ds.$$

Вместо  $a(t, x, \varepsilon)$  положим выражение (23) и из последнего неравенства имеем

$$\begin{aligned} \|\varphi(t, x, \varepsilon)\| & \leq C_0(\varepsilon) + C_4 \int_0^t \int_0^x \|\varphi(s, z, \varepsilon)\| dz ds + \\ & + C_3 \int_0^t e^{C_3(t-s)} \left\{ C_0(\varepsilon) + C_4 \int_0^s \int_0^x \|\varphi(s_1, z_1, \varepsilon)\| dz_1 ds_1 \right\} ds. \end{aligned}$$

Это неравенство интегрируем и применим формулу Дирихле:

$$\|\varphi(t, x, \varepsilon)\| \leq C_0(\varepsilon) e^{C_3 t} + C_4 \int_0^t \int_0^x e^{C_3(t-s)} \|\varphi(s, z, \varepsilon)\| dz ds,$$

Затем, заменяя  $t$  на  $T$ , получаем в виде

$$\|\varphi(t, x, \varepsilon)\| \leq C_0(\varepsilon) e^{C_3 T} + C_4 \int_0^t \int_0^x e^{C_3 T} \|\varphi(s, z, \varepsilon)\| dz ds. \quad (24)$$

На последнюю (24) применим лемму 2, имеем

$$\|\varphi(t, x, \varepsilon)\| = C_0(\varepsilon) e^{C_3 T} \left( 1 + \int_0^t \int_0^x C_0(\varepsilon) e^{C_3 T} R(t, x, s, z) dz ds \right),$$

$$\text{где } R(t, x, s, z) = \sum_{n=0}^{\infty} (C_4 e^{C_3 T})^{n+1} \frac{(t-s)^n (x-z)^n}{(n!)^2}.$$

Из последнего уравнением имеем

$$\|\varphi(t, x, \varepsilon)\| = C_0(\varepsilon)C_4, (t, x) \in G, \quad (25)$$

где  $C_0(\varepsilon) = (2N_0 + 1)e^{-\frac{1}{\varepsilon^{1-\beta}}}\sqrt{n}\|u(t, x)\|_C + (N_0 + 1)2\omega_u(\varepsilon^\beta)\sqrt{n}$ ,

$$C_4 = e^{C_3T} [1 + R(T, X, 0, 0)TX].$$

Таким образом, доказана следующая теорема.

**Теорема 1.** Пусть выполняются условия а), б), в) и система (1) имеет непрерывное решение  $u(t, x) \in C_n(G)$ ,  $u(t, 0) = 0$  при  $x \in [0, X]$  и  $\lambda_0(t) > 0$  при почти всех  $t \in [0, T]$ . Тогда решение  $u(t, x, \varepsilon)$  системы (3) при  $\varepsilon \rightarrow 0$  сходится к непрерывному решению  $u(t, x)$  системы (1) в области  $G$  и справедлива оценка (25).

**Теорема 2.** Пусть выполняются условия а), б), в), г) и  $\lambda_0(t) > 0$  при почти всех  $t \in [0, T]$ . Тогда решение системы (1) единственно в пространстве  $C_n(G)$ .

**Доказательство.** Пусть однородная система

$$\int_0^t K(t, x, s)u(s, x)ds + \int_0^t \int_0^x N(t, x, s, z)u(s, z)dzds = 0, (t, x) \in G$$

то есть система (1) при  $f(t, x) \equiv 0$  допускает ненулевое решение  $\mathcal{G}(t, x)$  при  $(t, x) \in G$ . Последнюю систему перепишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \int_0^t K(t, x, s)\mathcal{G}(0, x)ds + \int_0^t K(t, x, s)[\mathcal{G}(s, x) - \mathcal{G}(0, x)]ds + \int_0^t [K(t, x, s) - \\ & - K(s, x, s)]\mathcal{G}(s, x)ds + \int_0^t \int_0^x [N(t, x, s, z) - N(s, x, s, z)]\mathcal{G}(s, z)dzds = 0. \end{aligned} \quad (26)$$

Обе части системы (26) скалярно умножаем на вектор  $\mathcal{G}(0, x)$ . Скалярное произведение обозначим символом  $\langle \cdot, \cdot \rangle$ . Умножая справа и слева, затем суммируя их, имеем

$$\begin{aligned} & \int_0^t K(s, x, s)[\mathcal{G}(s, x) - \mathcal{G}(0, x)]ds + \mathcal{G}(0, x), \int_0^t [K(t, x, s) - K(s, x, s)]ds + \\ & + \mathcal{G}(s, z), \int_0^t \int_0^x [N(t, x, s, z) - N(s, x, s, z)]\mathcal{G}(s, z)dzds = 0. \end{aligned} \quad (27)$$

Отсюда, в силу условий теоремы, имеем

$$\begin{aligned} & \int_0^t \lambda_0(s)ds \|\mathcal{G}(0, x)\| \leq 2N_0 \int_0^t \lambda_0(s)ds \sup_{(s, x) \in G_1} \|\mathcal{G}(s, x) - \mathcal{G}(0, x)\| ds + \\ & + 2C \int_0^t \int_0^t \lambda_0(\tau)d\tau \cdot \|\mathcal{G}(dzds)\| d\tau ds + 2C_1 \int_0^t \int_0^t \int_0^x \lambda_0(\tau)d\tau \cdot \|\mathcal{G}(s, z)\| dzds. \end{aligned} \quad (28)$$

Далее, применяем формулу Дирихле и теорему о среднем и, деля обе части на  $\int_0^t \lambda_0(s)ds$  и переходя к пределу при  $t \rightarrow 0$ , получим

$$\mathcal{G}(0, x) = 0 \text{ при } x \in [0, X]. \quad (29)$$

Из (1) при  $f(t, x) = 0$ ,  $(t, x) \in G$ , имеем  $u(t, x, \varepsilon) = 0$  при всех  $(t, x) \in G$ ,  $\varepsilon > 0$ . Тогда в силу теоремы 1 имеем

$$\|u(t, x)\|_C = \|u(t, x, \varepsilon) - u(t, x)\|_C \leq [(2N_0 + 1)e^{-\frac{1}{\varepsilon^{1-\beta}}} + (N_0 + 1)\omega_u(\varepsilon^\beta)]\sqrt{n}e^{C_2T} \rightarrow 0$$

при  $\varepsilon \rightarrow 0$ . Таким образом  $\|u(t, x)\|_C = 0$ . Отсюда  $u(t, x) = 0$  при всех  $(t, x) \in G$ .

Теорема 2 доказана.

**Список литературы**

1. Варлань А.Ф. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. Киев: Наукова думка, 1979. С. 543.
2. Асанов А., Иманалиев М.И., Асанов Р.А. Один класс систем линейных интегральных уравнений Фредгольма третьего рода на полуоси // Символ науки. 2016. № 1. С. 16–20.
3. Искандаров С., Бокобаева З.Б. Об оценках решений и их первых производных линейного вольтеррова неявного интегро-дифференциального уравнения второго порядка // Вестник института математики НАН КР. 2018. № 1. С. 49–55.
4. Сергеев В.О. Регуляризация уравнений Вольтерра первого рода // Докл. АН СССР. 1971. Т. 197, № 3. С. 531–534.
5. Зулпукаров Ж.А., Алиева Ж.А. Построение регуляризации решения для уравнения Вольтерра первого рода // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2023. № 5. С. 52–60.
6. Сапарова Г.Б., Омурзаков Б.К. Интегральные уравнения Фредгольма второго рода в задачах экономики // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2022. № 8. С. 67–70.
7. Чоюбеков С. Примеры решения интегрального уравнения Вольтерра первого рода // Вестник ОшГУ. 2022. № 1. С. 167–176.